Über den heutigen Stand unseres Wissens vom Innern der Erde.

Zusammenfassung der modernen Hypothesen und der Ergebnisse der neueren Forschungen über das Erdinnere.

Sammelreferat,

erstattet von

Bruno Simmersbach in Wiesbaden.

Quellenverzeichnis:

Heinrich Simroth, Die Pendulationstheorie. Berlin 1914.

E. Fraas, Geologie. Leipzig 1908.

Herm. Credner, Elemente der Geologie. Leipzig 1897.

Hippolyt Haas, Unterirdische Gluten. Berlin 1910.

Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Bd. III. Jena 1913.

Edgar Dacqué, Grundlagen und Methoden der Paläographie. Jena 1915.

H. W. Dove, Der Kreislauf des Wassers auf der Oberfläche der Erde, Berlin 1866, in Samml. gemeinverständl. wissenschaftl. Vorträge, **Rud. Virchow** und **Fr. v. Holtzendorff**.

Alexander Supan, Grundzüge der physischen Erdkunde. Leipzig 1916

Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse:

1. Über die Massenverteilung im Innern der Erde, **E. Wiechert**, Göttingen 1897, Seite 221 ff.
2. Über Erdbebenwellen, **E. Wiechert** und **K. Zoeppritz**, Göttingen 1907, S. 415—549.
3. Über Erdbebenwellen, III. Berechnung von Weg und Geschwindigkeit der Vorläufer. Die **Poisson**sche Konstante im Erdinnern. **Karl Zoeppritz** und **Ludwig Geiger**. Göttingen 1909, S. 400 bis 428.
4. Über Erdbebenwellen. V. Konstitution des Erdinnern, erschlossen aus dem Bodenverrückungsverhältnis der einmal reflektierten zu den direkten longitudinalen Erdbebenwellen .... **Karl Zoeppritz**, **Ludwig Geiger** und **Beno Gutenberg**. Göttingen 1912, S. 121—206.

5. Über Erdbebenwellen. VII. Konstitution des Erdinnern, erschlossen aus der Intensität longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen und einigen Beobachtungen an den Vorläufern. Ludwig Geiger und Beno Gutenberg. Göttingen 1912, S. 623—675.
6. Die seismischen Registrierungen am Samoaobservatorium der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen in den Jahren 1909 und 1910. Kurt Wegener. Göttingen 1912, S. 267—384.
7. Über Erdbebenwellen. VII a. Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben in Göttingen und Folgerungen über die Konstitutiou des Erdkörpers. Beno Gutenberg. Göttingen 1914, S. 125—176.

Wilhelm Schweydar, Untersuchungen über die Gezeiten der festen Erde und die hypothetische Magmaschicht. Veröffentlichung des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts. Neue Folge Nr. 54. Potsdam 1912.

O. Hecker, Beobachtungen an Horizontalpendeln über die Deformation des Erdkörpers unter dem Einfluss von Sonne und Mond. Veröffentlichung des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts Nr. 32, Berlin 1907, und Nr. 49, Berlin 1911.

„Die Geologie folgt in der Grösse und Erhabenheit der Gegenstände, von denen sie handelt, in der Reihenfolge der Wissenschaften, ohne Zweifel sogleich auf die Astronomie.“
J. F. W. Herrschel.

Unsere Erde, der dritte Planet des Sonnensystems, ist der Gestalt nach eine an den Polen um etwa 0,031 des Durchmessers abgeplattete Kugel, mit der Anziehungskraft des Mittelpunktes gegen ihre Oberfläche. Die Kugelform ward von den Alten schon früh erkannt, und der Schluss auf diese Form ergab sich schon aus dem Umstande als notwendig, dass man unter dem Himmelsgewölbe am Rande desselben die höher liegenden Gegenstände zuerst erblickte. Die runde Form des Erdschattens auf dem Monde, der allmähliche Auf- und Niedergang der Sonne, der veränderte Stand der Gestirne nach der Entfernung vom Äquator u. a. m., alles dies musste ebenfalls auf den gleichen Schluss führen.

Auf die Abplattung kam man erst am Schluss des 17. Jahrhunderts, ungefähr um dieselbe Zeit, als Newtons Theorie über die Schwere allgemein als richtig erkannt wurde. Der Franzose Riches bemerkte in Cayenne die Abweichung des Pendels von den Schwingungen desselben in Frankreich. Man zog daraus nach Newtons Theorie den Schluss, die Schwerkraft der Erde müsse gegen den Äquator hin zunehmen. Nachdem man lange darüber hin und her gestritten, liess die französische Regierung die Reisen Bouguers und Condamines nach Peru, Maupertuis usw. nach Lappland unternehmen, welche Männer dann

durch neue Beobachtungen der Pendelschwingungen und Vermessungen die Sache ausser Zweifel setzten. Die Grössenbestimmung der Erde nach dem Meridian, zuerst von Snellius, einem holländischen Mathematiker und Professor in Leyden (1615), versucht, ist von Maupertuis nach vorangegangenen vielen Arbeiten Cassinis und anderer Forscher um die Mitte des 18. Jahrhunderts mit ziemlicher Annäherung angegeben, und seitdem noch weiter berichtigt worden. Ganz genau lässt sich aber die Angabe ebenso wenig machen, wie in betreff der Pole. Man nimmt als mittleren Erddurchmesser 1719 geographische Meilen, als Erdumfang 5400,007 geographische Meilen an. Der höchste Berg würde etwa nur 0,0019 des Erddurchmessers betragen. Die polare Achse misst 1713 geographische Meilen. Die Abplattung an jedem der Pole beläuft sich somit auf etwa 3 Meilen, so dass die Abweichung von der Kugelform nur eine äusserst geringe ist. Die Gestalt der Erde nähert sich trotz zahlreicher Abweichungen am meisten einem, mit polarer Abplattung versehenem Rotationsellipsoid. Nach Clarke ist der Äquatorialhalbmesser = 6 378 190 m, der Polarhalbmesser = 6 356 455 m, die Abplattung = $^1/_{293}$; für letztere berechnet Helmert $^1/_{296}$. Die Entdeckung des Jahres 1672, dass das aus höheren Breiten nach dem Äquator hin gebrachte Sekundenpendel eine geringere Anzahl von Schwingungen macht als früher, also verkürzt werden muss, erschütterte das Theorem von der Kugelgestalt der Erde, auf deren Oberfläche die Schwerkaft, also auch die Zahl der Pendelschwingungen überall die gleiche hätte sein müssen. Die genannten französischen Expeditionen der Jahre 1735 und 1736 bestätigten dann die neuere Theorie von der ellipsoidischen Gestalt der Erde; die Länge eines Meridiangrades in Lappland ergab sich zu 111 949 km und in Peru zu 110 608 km.

Die geometrische Gestalt der Erde bezeugt die Art ihres Urzustandes; ihre Form als Rotationsellipsoid deutet darauf hin, dass sich ihr Material ursprünglich in einem plastischen, einem flüssigen Zustande befunden hat. Die Ansicht der Geologen, dass dieser Zustand ursprünglich ein glutflüssiger gewesen sei, erhält durch vielfache Beobachtungen einen festen Stützpunkt. Damit stimmen auch die Resultate der durch spektralanalytische Untersuchungen bestätigten astronomischen Forschungen überein, welche unser Planetensystem von einem in glühend-gasförmigen Zustande befindlichen Nebelflecke ableiten und die einzelnen Planeten als in verschiedenen Stadien der Abkühlung befindliche losgetrennte Ballen jenes früher einheitlichen Urnebelfleckes ansehen.

Es wird nämlich nach der von **Kant** und **Laplace** aufgestellten Theorie angenommen, dass die Erde ebenso wie die anderen Planeten sich in gasförmigem Zustande von der Sonne abgelöst habe, um nun als selbständiger Weltkörper, aber immer noch in Abhängigkeit von ihrem Entstehungspunkt, der Sonne, im Weltenraume zu schweben. Diese Annahme über den Ursprung der Erde ist zwar nur eine Hypothese, aber diese gewinnt an Wahrscheinlichkeit durch eine Reihe von Erscheinungen, welche mit ihr in vollem Einklang stehen und die sich auf andere Weise kaum erklären lassen, wie der Kreislauf der Erde um die Sonne, das Verhältnis zu den anderen Planeten, die Abplattung an den Polen u. a. m.

Die ursprünglich gasförmige Kugel musste sich schliesslich im Weltenraume von aussen her abkühlen und die ursprünglich gasförmigen Elemente begannen sich zu verbinden und in einen glutflüssigen Zustand überzugehen, bis auch dieser schliesslich dem festen Aggregatzustande wich. So bildete sich die erste Erstarrungskruste der Erde, welche mit der Zeit immer mehr an Dichtigkeit und an Mächtigkeit zunahm. Über die Dicke der starren Erdkruste können wir zwar nichts Bestimmtes angeben, aber wir können andererseits auch annehmen, dass die Erde noch keineswegs völlig erstarrt ist. Die glutflüssigen Lavamassen der Vulkane, die heissen Quellen und Geiser, endlich die Beobachtungen in Bohrlöchern und Bergwerken, welche eine stetige Zunahme der Temperatur nach der Tiefe zu ergeben, beweisen uns mit Sicherheit, dass im Erdinnern noch Verhältnisse herrschen, unter denen sich die Gesteine in flüssigem, vielleicht noch in gasförmig überhitztem Zustande befinden. Das Innere der Erde ist uns darum so gut wie nicht bekannt, denn man kann kaum behaupten, $^1/_{809}$ Tiefe des Durchmessers unter der Erdoberfläche zu kennen, sicher ist nur die Wärmezunahme. Je tiefer man in unseren Planeten eindringt, desto höhere Temperatur trifft man an, und wenn auch die Berechnung von **Arrhenius**, dass in 1000 km Tiefe an 30 000 Grad Hitze herrschen, auf den ersten Blick hin phantastisch erscheinen möchte, jedenfalls ist es in der Tiefe der Erde so heiss, dass alle Metalle und Gesteine der Erde sich in geschmolzenem Zustande befinden müssen. — Damit ist nun freilich nicht gesagt, dass diese Massen auch flüssig sind, denn es existiert dort unten ein so riesiger Druck und verschiedene andere Erscheinungen — die zum Teil erst neuerdings erklärt und beobachtet werden konnten — sprechen dafür, dass das Erdinnere **fest** ist. So schliesst z. B. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen

einen flüssigen Zustand des Erdinnern aus, und wenn letzterer dennoch vorhanden wäre, dann müsste nach der Berechnung der Astronomen Ebbe und Flut in ihr entstehen, die mit ihrer gewaltigen Bewegung die Erdkruste einfach zersprengen würde.

Besser als über die Temperatur und den allgemeinen Zustand des Erdinnern sind wir über das Gewicht der Erde unterrichtet. Es ist so hoch, dass man das Vorhandensein grosser Eisenmassen im Erdkern anzunehmen gezwungen ist, eine Auffassung, die auch in der stofflichen Zusammensetzung vieler auf die Erde herabfallender Meteorite ihre Stütze findet, die ja nichts anderes als Bruchstücke zerstörter Weltkörper sind und oft aus Eisen bestehen.

Das hohe spezifische Gewicht der Erde muss überraschen, wenn man es mit der bekannten festen Erdkruste vergleicht, welches etwa 2,5 beträgt, während sich die Dichtigkeit der kontinentalen und der ozeanischen Erdoberfläche zusammen auf kaum 1,6 beläuft. Die mittlere Dichtigkeit der Erde beträgt demgegenüber etwa 5,6, wie man durch verschiedene Messungsmethoden auf indirektem Wege festzustellen vermag. Es ergibt sich daraus, dass das spezifische Gewicht des Erdinnern bedeutend grösser sein muss als 5,6, sowie die weitere Wahrscheinlichkeit, dass die Dichtigkeit des Erdmaterials mit der Tiefe zunimmt. Das sind wiederum Beweise, welche ähnlich wie die Gestalt der Erde einen ursprünglich flüssigen Zustand unseres Planeten voraussetzen, besonders wenn man noch in Betracht zieht, dass Mittelpunkt und Schwerpunkt der Erde zusammenfallen. Es findet in unserer Erdkugel eine vollkommen regelmäfsige Anordnung der gleichdichten Massen zu konzentrischen Zonen statt, dergestalt, dass die spezifisch schwersten den inneren Kern einnehmen, um welchen sich Schalen von nach aussen immer geringer werdender Dichtigkeit lagern.

Aus der Zunahme der Erddichte gegen ihren Mittelpunkt, sowie aus dem Vergleiche zwischen der chemischen Zusammensetzung der Meteoriten und den Gesteinen der Erde schlossen schon Dana, Daubrée u. a., dass das Erdinnere aus Metallmassen, vorwiegend aus Eisen bestehe. Hierfür scheinen auch die grossen, bis zu 500 Zentner schweren Blöcke von gediegenem Eisen zu sprechen, welche vom Basalte aus der Erdtiefe mit hervorgebracht, von Nordenskjöld bei Ovifak an der Westküste von Grönland gefunden wurden.

Wenn die Vulkane kein Eisen fördern, so liegt dies daran, dass das Eisen vermöge seiner Schwere tief in die Erde eingesunken ist, in

jenen fernen Zeiten, als die Erde noch ein glutflüssiger Ball war. Aus jener Zeit stammt auch noch die Hauptmasse der Wärme, welche unser Planet sich in seinem Innern bewahrt hat, wenn man auch als eine zweite, nicht zu verachtende, aber doch viel weniger bedeutende Wärmequelle das Radium ansehen muss. —

Vor rund 60 Jahren brachte der bedeutende Geologe K. F. Naumann über das Innere der Erde folgende Ansicht zu Papier: «Das Innere unseres Planeten ist für unsere unmittelbaren Wahrnehmungen so unerreichbar, dass man es auf den ersten Blick für ein verwegenes und fruchtloses Beginnen halten möchte, irgend etwas Bestimmtes über seine Beschaffenheit ausmitteln zu wollen. Indessen sind die uns ewig verschlossenen Abgründe der Tiefe gewissermaſsen denen uns gleichfalls unerreichbaren Fernen des Himmelsraumes zu vergleichen, und wie wir über diese letzteren wesentlich durch das Licht belehrt werden, so gewinnen wir über das Erdinnere den wichtigen Aufschluss durch die Wärme. Der Astronom befragt den aus unendlicher Ferne kommenden Lichtstrahl, der Geolog den, wie der Bergmann sagt, aus ewiger Tiefe hervorbrechenden Wärmestrahl».

In abgerundeten Maſsen angegeben, beträgt der Halbmesser unserer Erde 6377 km am Äquator und 6536 km an den beiden Polen. Das tiefste Bohrloch nun, welches unsere heutige moderne Technik in die Erdkruste niedergebracht hat, ist dasjenige von Czuchow bei Czerwionka in Oberschlesien, woselbst man eine Teufe von 2239,72 m erreicht hat. Die Gesamtlänge dieses tiefsten Bohrlochs der Welt entspricht $^1/_{2847}$ des äquatorialen und $^1/_{2833}$ des polaren Radius unserer Erde. Man muss daher sagen, wir kennen vom Inneren unseres Planeten bis jetzt höchstens $^1/_{2840}$ des Erdhalbmessers, von den übrigen $^{2839}/_{2840}$ Teilen wissen wir garnichts bestimmtes. Für unsere Kenntnis dieses allergrössten Teiles sind wir lediglich auf Vermutungen und Hypothesen angewiesen, auf Ansichten, die allerdings nicht aus der Luft gegriffen wurden, sondern auf Erfahrungen beruhen, die wir den chemischen und physikalischen Vorgängen auf der Erdoberfläche und den Errungenschaften der Astronomie verdanken. Immerhin sind es nur Vermutungen und Hypothesen, aber keine feststehenden Sätze.

Eng verbunden mit der Frage vom Zustande des Innern unserer Erde ist wohl zunächst diejenige nach dem spezifischen Gewichte, nach der Dichtigkeit unseres Erdballs. Die Gesetze der Schwerkraft lassen uns die Möglichkeit, diesen Weg forschend zu betreten und schon vor rund

135 Jahren gelang es vermittels der Methode der Lotablenkung, den Wert von 4,71 für die mittlere Dichtigkeit der Erde zu finden. Viel Zeit und noch viel mehr Scharfsinn wurden seither aufgewandt, um genauere Resultate zu erhalten. Man benutzte die Schwingungen des Pendels, auf hohen Bergen und in tiefen Schächten; Lord Cavendish die Drehwage und so immer neuere moderne Apparate, die uns zum Ziele führen sollen. So verschiedenartig wie die einzelnen Untersuchungsmethoden, waren naturgemäfs auch die erhaltenen Ergebnisse. Berget erhielt den Wert 5,41 für das spezifische Gewicht der Erde, Pointing 5,49, Mendenhall 5,77 (?), Wilsing 5,59, Lord Cavendish 5,48, Jolly 5,692. Der letztgenannte Wert ist der grösste bisher gefundene, wenn man die ganz zuverlässigen Beobachtungen allein in Betracht zieht. Als Mittelwert für die Dichte der Erde wird man wohl die Zahl 5,57 am besten setzen: jedenfalls ist die Dichte grösser als 5,4 und kleiner als 5,7.

Nun beträgt die mittlere Dichte der die Gesteinshülle, die Lithosphäre unseres Planeten bildenden Felsarten, soweit dieselben uns bekannt und unseren Untersuchungen zugänglich sind, etwa 2,6 bis 2,7. Ziehen wir aber die vom Ozean bedeckten Flächengebiete mit in die Rechnung hinein, so sinkt der Wert für die mittlere Dichte der ganzen Erdoberfläche gar auf 1,6 herab. Daraus ergibt sich somit schon eine erste feststehende Tatsache, dass das spezifische Gewicht der inneren Teile unserer Erde noch viel höher sein muss als 5,57. Laplace hat die Dichtigkeit des Erdkerns zu bestimmen versucht, indem er eine Dichtigkeitszunahme in arithmetrischer Progression annahm, und er bekam als Resultat die Zahl 10,047, während Plana bei Annahme eines spezifischen Gewichts der Erdoberfläche von 1,877 sogar den Wert von 16,73 für die Kerndichte berechnete. Alle diese Rechnungsergebnisse zwingen nun zu dem naheliegenden Schluss, dass im Erdinnern schwere Stoffe gelagert seien, die wahrscheinlich aus Eisen bestehen müssten. Das spezifische Gewicht dieses, nächst dem Aluminium, die grösste Verbreitung in unserer Erdrinde besitzenden Metalls ist gleich 7,844 in reinem Zustand (Fe). J. D. Dana, ein amerikanischer Forscher, brachte uns den Nachweis, dass sich die Behauptung von einem eisernen Erdkern sehr gut mit der ermittelten Dichtigkeit der Erdkugel vereinbaren lasse. Etwa $^2/_3$ der Erdmasse müssten aus Eisen bestehen und der eiserne Kern etwa bei 800 km Tiefe beginnen. In der grossen Verbreitung, welche das Eisen auch in kosmischer Hinsicht, Meteoriten, besitzt, erhält diese Annahme eine wesent-

liche Stütze. Auch sind uns ja die weiteren an der Zusammensetzung der Meteoriten teilnehmenden Massen ebenfalls als Bestandteile der Erdrinde bekannt.

Ein deutscher Forscher, Dr. A. Stübel in Dresden, hat mehrfach beobachtet, dass Schollen festgewordener Lava auf flüssiger Lava zu schwimmen vermögen, woraus geschlossen werden muss, dass die feste Lava ein geringeres spezifisches Gewicht besitzt als die flüssige, also bei ihrem Übergang aus dem flüssigen in den festen Aggregatzustand ein grösseres Volumen angenommen hat (A. Stübel, Die Vulkanberge in Ecuador). «Wenn aber die Materie in flüssigem Zustand schwerer ist als ihr Erstarrungspunkt, so kann es uns auch nicht befremden, dass die mittlere Dichtigkeit des Erdkörpers, dessen Inneres diese Materie zu bergen scheint, die Dichte jener, an der Erdoberfläche uns zugänglichen, unzweifelhaft eruptiven Gesteine übersteigt. Das spezifische Gewicht mancher Basalte beträgt bis zu 3,3. Eine Frage ist etwa noch, ob der Dichtigkeitsunterschied von etwa 2,2 bis 3,3 lediglich auf Rechnung der mit dem Druck progressiv nach der Tiefe zunehmenden Dichte der glutflüssigen Materie gesetzt werden dürfe, oder aber mit vielleicht grösserer Berechtigung, in dem Vorwalten schwererer Bestandteile in der Mischung der Materie nach der Tiefe zu suchen wäre?»

Gestützt auf genaue Rechnungen haben schon verschiedene Forscher behauptet, die Abkühlung der Erde müsste infolge ihrer Wärmeausstrahlung in den Weltenraum bereits viel weiter vorgeschritten sein, als dies wirklich der Fall ist. Aus solchen Tatsachen wurde gefolgert, dass die Abkühlungshypothese zur Erklärung nicht genüge, dass vielmehr zur Erklärung der Erdwärme ganz andere Prozesse, so radioaktive und chemische, herangezogen werden müssten. Radium hat universelle Verbreitung, die Sonne, die atmosphärische Luft, die Niederschläge, sehr viele Quellen und die meisten Gesteine verhalten sich radioaktiv. Nun ist die Radiummenge unserer Erde und ihre Lufthülle grösser als zur Herstellung des thermischen Gleichgewichts erforderlich wäre. Da aber die Erde nicht allmählich wärmer wird, kann die Radioaktivität auch nicht gleichmäſsig über die ganze Erdmasse verteilt sein. Sie muss auf eine Oberflächenschale beschränkt sein, während der Erdkern frei davon ist. Diese Mächtigkeit der aktiven Schale ist von dem mittleren Radiumgehalt der Gesteine abhängig und zwischen 200 bis 300 km einzusetzen. Ein durch Radiumwärme erzeugtes stationäres Wärmegleichgewicht besteht sicherlich nicht. Dagegen lässt sich deutlich erkennen,

dass durch die Wärmeerzeugung des in der Oberflächenschale zerfallenden Radiums und anderer radioaktiver Stoffe der Abkühlungsprozess der Erde ausserordentlich stark aufgehalten wird. So besteht demnach der jetzige Wärmereichtum unserer Erde in zwei Wärmequellen, einmal in dem ursprünglichen Vorrat an Eigenwärme, dann aber noch in der durch radioaktive Vorgänge an der Erdoberfläche erzeugten Wärme. Der Abkühlungsprozess der Erde strebt dem thermischen Gleichgewicht zu, ohne es bisher erreicht zu haben. Wie gross der Anteil ist, der im Wärmehaushalt der Erde auf Rechnung radioaktiver Prozesse zu setzen ist, lässt sich nicht feststellen, indessen werden sie wohl die Hauptmasse der ausgegebenen Wärme liefern.

War, wie wir annehmen, unsere Erde einmal ein glühender Gasball, dessen Kern mit der Zeit in flüssigen Zustand überging und sich später mit der festen Erstarrungskruste umkleidete, so muss infolge stetiger Wärmeabgabe an den kalten Weltenraum die Dicke dieses erstarrten Mantels immer mehr zugenommen haben und tut dieses noch heute. Aber so wohlbegründet diese Annahme auch erscheint, so schwierig ist es, sich ein genaues Bild von der Beschaffenheit des Erdinnern zu machen. Darum gehen denn auch die Vorstellungen über diesen Punkt noch sehr weit auseinander. Die Ungewissheit betrifft zuerst schon mal die Dicke der Erdrinde. Humboldt und Elie de Beaumont haben sie auf 40—50 km geschätzt, Pfaff auf 70—90; Pilar veranschlagte sie auf etwa 150 km, mindestens aber auf 120 km, Fischer rechnete nur 40 km, Svante Arrhenius wieder 40—60 km; Dölter nimmt einige hundert Kilometer an, neuerdings setzt man 1200 bis 1500 km an.

Sigmund Günther ist bei seinen Betrachtungen über den möglichen Zustand des Erdinnern zu Anschauungen gelangt, welche er die Kontinuitätshypothese genannt hat (Handbuch der Geophysik I. 1897). Nach ihm sind: «im Innern des Erdballs alle überhaupt denkbaren Aggregatzustände zwischen nahezu totaler Starrheit und absoluter Dissoziation vorhanden, und zwar gibt es keine wie immer beschaffene Trennungsflächen, sondern der Übergang ist ein absolut lückenloser, so dass zwei zunächst benachbarte, unendlich dünne Kugelschalen auch hinsichtlich ihrer Molekularbeschaffenheit einen wenn auch noch so geringen Unterschied aufweisen müssten.» Wir hätten dann 7 verschiedene Zonen im Erdball (?). Nach Günthers Theorie bestände das Erdinnere im engeren Sinne aus einem einatomigen Gase. Das wäre die letzte und innerste Zone.

Ähnlich ist die Vorstellung von Penck (Morphologie der Erdoberfläche), der den Erdball für eine Gaskugel erklärt, welche zunächst von einer flüssigen Magmaschicht und dann von einer festen Kruste umgeben ist. Beide Hüllen setzten sich aber weder scharf von einander, noch vom Kerne ab. Die starre Erdkruste ruht nach Pencks Anschauung gleichsam auf einem weichen Polster latent-plastischen und darunter flüssigen Materials und befindet sich in Ruhezustand, in einer Art hydrostatischen Gleichgewichts; die hohen kontinentalen Teile sind die leichteren, die organischen die schwereren, wie es auch den tatsächlichen Verhältnissen entspricht. Die Erde ist in viele, grössere und kleinere Schollen zerborsten, die gegeneinander in Bewegung waren oder noch sind und dabei gebogen oder sogar zusammengeschoben wurden. Diese Zustände beruhen auf der Neigung der Erdkruste, sich im Verlaufe der fortschreitenden Erstarrung des Planeten dem stets mehr und mehr schwindenden inneren Glutkern anzuschmiegen und anzupassen. Die Kernhülle ist unter den Ozeanen durchschnittlich stärker abgekühlt und kontrahiert anzunehmen, als wie unter der Landoberfläche; daraus ergibt sich wieder die grössere Dichte der unter den Ozeanen belegenen Teile der Erdkruste gegenüber der geringeren bei den von den Kontinenten bedeckten. Die Permanenz der grossen organischen und kontinentalen Räume erscheint Penck schon als Folge der ungleichen Abkühlung des Erdballs. Diese sind die stabilen Gebiete der Erdkruste, im Gegensatz zu denjenigen, welche durch Zusammenstauen der festen Erdhülle, durch Faltung und Überschiebung der Schichten, durch die vulkanische Tätigkeit im weiteren und engeren Sinne gegeneinander beweglich sind, den labilen Gebieten.

Nach Alphons Stübel hat sich um den glutflüssigen Erdball im Laufe der Äonen ein System von Gesteinsbänken gebildet, welches den Planeten rings umschalt. Die Dicke dieser Panzerdecke lässt sich nur relativ abschätzen, nicht in Zahlen ausdrücken; sie steht in einem bestimmten Verhältnis zu der Tiefe, bis zu welcher die Erstarrung des Erdkörpers als vorgeschritten gedacht wird und zu der Grösse der Ausdehnungsfähigkeit, die wir dem Magma beimessen. Für die richtige Beurteilung der Tiefe, bis zu welcher die Erstarrung des Erdkörpers wohl fortgeschritten sein kann, ist an erster Stelle das Intensitätsverhältnis zwischen den Äusserungen der vulkanischen Kräfte der ältesten Vergangenheit und denen der Gegenwart mafsgebend.

Nun besitzen wir aber noch ein weiteres Mittel, um die Tiefe abzuschätzen, bis zu welcher die Erstarrung der Erde wohl vorgedrungen

ist. Das sind die metamorphischen und sedimentären Gesteinsschichten, die nur aus Material zusammengesetzt sein können, das den Erstarrungsprodukten der Erdoberfläche, also der Panzerdecke, entstammt. Würden wir aber die Mächtigkeit dieser jüngeren Ablagerungen, zu denen nach Stübel höchstwahrscheinlich manche Gesteinsarten zählen, die bis jetzt noch vielfach als Eruptivgesteine betrachtet werden, ohne es zu sein, auch nur auf 15—20 km veranschlagen, so stellt dieses Schichtensystem in seiner ganzen vertikalen Ausdehnung doch nur erst einen Bruchteil der von uns vorausgesetzten Mächtigkeit der Panzerdecke dar. Wenn aber ein Schichtensystem von nur 15—20 km Mächtigkeit gewissermafsen nur die Rolle einer Verwitterungsrinde des eruptiven Untergrundes spielt, so können wir uns leicht vergegenwärtigen, welche unermessliche Zeiträume vergangen sein müssen, um die lange Reihe der mechanischen und chemischen Aufbereitungsprozesse ablaufen zu lassen, deren vielleicht ein jeder einzelne die Dauer von Jahrmillionen für sich in Anspruch nahm, und durch welche Prozesse das vulkanische Material erst bis in das der Sedimentformation übergeführt wurde. Welche Zeiträume müssen aber bereits verstrichen gewesen sein, bevor überhaupt äussere Einflüsse diese Umwandlungsvorgänge einleiten konnten! Aus diesen Zeiträumen lässt sich also mit einiger Sicherheit auf die ungeheure Tiefe schliessen, bis zu welcher die Erstarrung des Erdkörpers notwendig vorgeschritten sein muss. Die Dauer der Zeiträume für die petrographische Entwicklung und morphologische Ausgestaltung der Erdoberfläche zu hoch zu veranschlagen, kommt der menschliche Geist nicht leicht in Gefahr, höchstens in die, sie zu kurz zu bemessen.

Von Lord Kelvin (Sir William Thomson) wurde der Satz ausgesprochen, beim gegenwärtigen Standpunkte der Wissenschaft sei diejenige Annahme die vorzuziehende, dass unser Planet einen chemisch untätigen, in der Abkühlung begriffenen Körper darstelle.

Friedrich Ratzel nannte dies eine resignierte Antwort, die nur entstanden sei unter dem Banne der ehrwürdigen Hypothese von der im Erdinnern noch vorhandenen planetaren Urwärme. Diese letztere Anschauung sei aber zudem gar nicht die Folgerung aus der Kant-Laplaceschen Theorie. Diese verlange vielmehr immer neue Wärmeerzeugung für die Erdkugel, die sich langsam von aussen nach innen abkühlt, zugleich aber auch zusammenzieht, wodurch mehr Wärme geschaffen wird, als durch Ausstrahlung verloren geht.

Schon zu Ende der dreissiger Jahre des vorigen Jahrhunderts ist der Engländer Hopkins in seinem Researches in physical Geology, durch die Präzessionserscheinungen zu der Überzeugung gebracht worden, unser Erdkörper müsse gänzlich starr sein, eine Anschauung, die auch G. Darwin, E. Wiechert und andere Physiker und Astronomen immer wieder vertreten haben. Ein glutflüssiger und planetarer Kern wäre nicht imstande, der festen Kruste in ihren täglichen Umdrehungsbewegungen zu folgen und die durch Sonne und Mond auf und an unserem Planeten hervorgerufenen Anziehungserscheinungen müssten im Falle der Existenz eines feurigflüssigen Innern andre sein, als sie tatsächlich sind. Ebbe und Flut könnten nicht zur Ausbildung gelangen, wenn ein von einer dünnen Kruste umschlossener feurigflüssiger Erdkern vorhanden wäre. Auch der Österreicher Reyer (Theoretische Geologie, Stuttgart 1888) ist ein Anhänger der Theorie von einem starren oder beinahe starren Erdkörper. Die Hauptmasse des Magmas, des ursprünglich glutflüssig gewesenen Gesteinsbreies ist in der Tiefe verfestigt und zwar infolge des hohen Drucks, dem die der Verfestigung entgegenwirkende Temperatur nicht die Wage zu halten vermag. Aber dennoch ist das Magma ausbruchsfähig durch Risse in der Erdkruste, die vielleicht infolge von Spannungsunterschieden eintreffen.

Reyers Versuch, die von den Astronomen gestellte Forderung eines im starren Zustande befindlichen Erdinnern mit der zur Erklärung der vulkanischen Erscheinungen nötigen Annahme des Vorhandenseins glutflüssiger Materie in der Tiefe in Einklang zu bringen, wird in noch besserer Form von Svante Arrhenius angestrebt. Auf Grund der geothermischen Tiefenstufe kommt er nämlich zu dem Schlusse, dass in einer Tiefe von 40 km eine Temperatur von 1200 ^{0} C bestehen müsse bei 10 840 Atmosphären Druck, wenn man die mittlere Dichte der Erdkruste zu 2,8 ansetze. Bei dieser Temperatur werden aber schon die meisten Mineralien verflüssigt und sie lösen dann ihrerseits wieder die schwerer schmelzbaren Bestandteile auf; ein Umstand, der durch den hohen Druck wahrscheinlich noch wesentlich begünstigt wird, weil in den meisten Fällen die Auflösung zudem mit einer Kontraktion verbunden ist. Man hat somit nach Arrhenius von einer Tiefe von etwa 40 km ab einen feurigflüssigen Zustand des Erdinnern anzunehmen und von da ab herrscht das Magma, eine infolge des hohen Drucks äusserst zähflüssige und nur noch wenig zusammendrückbare Masse. Weil aber in einer Tiefe von 300 km die Temperatur so hoch ist, dass

sie zweifelsohne die kritische Temperatur jedes uns bekannten Körpers übersteigt, so kann dieser Zustand eines glutflüssigen Magmas nicht bis zu besonders grösseren Erdtiefen vorhalten, sondern es muss in kontinuierlicher Weise in ein gasförmiges Magma übergehen. In diesem aber werden die Zähflüssigkeit und der Mangel an Zusammendrückbarkeit noch grössere sein, als im flüssigen Magma. Arrhenius gelangt dann zu dem folgenden Schluss, die Dichtigkeit, die Kompressabilität und die Zähflüssigkeit eines solchen Gases sind von einer solchen Grössenordnung, dass wir es wegen dieser Eigenschaften als festen Körper bezeichnen würden, wenn wir aus wichtigeren Umständen nicht schliessen müssten, dass ein gasförmiger vorläge.

Das Vorhandensein eines aus Eisenmassen bestehenden Erdkerns von sehr grosser Dichtigkeit nimmt auch Arrhenius an, dieser Eisenkern muss aber tiefer als das Gesteinsmagma liegen und soll wegen der hohen Temperatur jedenfalls gasförmig sein.

Etwa die Hälfte des Erdkörpers würde demnach aus Eisenmassen bestehen, worin andere Metalle in geringerer Menge gemischt vorkommen.

Der erste, welcher zu genauerer Kenntnis des Erdinnern zu kommen suchte, war E. Wiechert, in seiner Arbeit über «Die Massenverteilung im Innern der Erde». Wiechert machte die Annahme, dass die Erde aus einem Kern und einem Mantel bestünde, und dass innerhalb eines jeden dieser beiden Teile die Dichte unveränderlich sei. Für den Mantel nahm er als Dichte diejenige der uns bekannten Gesteine, 3,0 bis 3,4 an. Unter Benutzung der rechnungsmäfsig bekannten mittleren Dichte der Erde von 5,53 und ihrer Abplattung von $^1/_{298}$ bis $^1/_{290}$, fand dann Wiechert, dass unter den gemachten Annahmen die Grenze der beiden Schichten — also zwischen Gesteinsmantel und Erdkern — in 1200 bis 1500 km Tiefe liege, und dass die Dichte des Kerns 7,9 bis 8,4, also wenig über der Dichte des Eisens 7,8 sei.

Wiecherts Untersuchungen, unter Fortlassung all der meist sehr komplizierten Berechnungen, sind in folgendem kurz zusammengestellt.

Die Beobachtungsdaten über die Oberflächendichte und die mittlere Dichte der Erde, über ihre Abplattung und über Präzession und Nutation führen alle gleichmäfsig zu dem Schluss, dass die Erde im Innern erheblich dichter ist als an der Oberfläche. Man findet bei den einschlägigen Rechnungen die Dichte im Mittelpunkt der Erde um ein Mehrfaches grösser als aussen. In seinen «Physikalischen Theorien der höheren Geodäsie» setzt Helmert in zwei näher untersuchten Fällen

die Oberflächendichte = 2,6 und = 2,8 und er erhält für den Mittelpunkt die Dichten 11,2 und 11,6. Somit wäre das Verhältnis etwa 1:4.

Die oft gemachte Annahme, bei der die Dichtevermehrung nach innen zu als eine Folge des zunehmenden Druckes betrachtet wird, scheint E. Wiechert in seinen Untersuchungen über die Massenverteilung im Innern der Erde, nach allem, was wir über den molekularen Bau der Materie wissen, äusserst bedenklich. Nach Wiechert müssen wir in den Molekülen sehr widerstandsfähige Dinge sehen, die in den festen Körpern schon unter gewöhnlichen Druckverhältnissen wegen der wechselseitigen Kräfte so enge aneinander liegen, dass eine erhebliche Kompression durch Druck nicht mehr stattfinden kann. Es scheint Wiechert daher richtiger, die Dichtenunterschiede in der Erde durch Materialverschiedenheiten zu erklären.

Die mittlere Dichte der Erde beträgt etwa 5,6. Die Dichten der Gesteine, welche sich hauptsächlich an dem Bau der Erdrinde beteiligen, gehen wenig über 3 hinaus, liegen also erheblich unter der mittleren Dichte. Von Substanzen mit Dichten über 5,6 kommen nur Metalle in Betracht, deren Dichten etwa bei 7 beginnen. Aus diesen Daten ist nach Wiecherts Ansicht erstens zu schliessen, dass die Erde einen Metallkern enthält, und zweitens, dass an der Grenze des Kerns sehr wahrscheinlich ein jäher Sprung der Dichte stattfindet. Stellt man sich die Aufgabe, mit möglichst einfacher Rechnung den wirklichen Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, so erscheint hiernach die Annahme einer stetigen Änderung der Dichte unzweckmäfsig, und es empfiehlt sich weit mehr, statt dessen vorauszusetzen, die Erde bestehe aus einem Kern konstanter Dichte, der von einem Mantel ebenfalls konstanter Dichte umgeben ist.

Wiechert entwickelt dann spezielle Annahmen über die Massenverteilung im Erdinnern, und nimmt zuerst an, die Erde bestehe aus einem Kern konstanter Dichte und einem Mantel ebenfalls konstanter Dichte. Es sei die mittlere Dichte der Erde d_m, die Dichte des Mantels d, und die Dichte des Kerns d'. Gewöhnlich geht man nun von der Voraussetzung aus, die Massen in der Erde seien so verteilt, wie es beim flüssigen Zustande der Fall wäre, d. h., man betrachtet die Flächen gleicher Dichte als Niveauflächen der Schwere. Diese «Hypothese des hydrostatischen Gleichgewichts», wie Wiechert sie nennt, verlangt, dass Kern und Mantel durch Niveauflächen der Schwere begrenzt werden. Diese Hypothese wird nun des Näheren untersucht. Für die mittlere

Dichte der Erde wurde angenommen $d_m = 5{,}58$. Für die Dichte des Steinmantels d berücksichtigt Wiechert die Werte 3,0, 3,2, 3,4 und er bevorzugt 3,2. Für die Abplattung ε des Erdellipsoids berücksichtigt er die Werte $^1/_{300}$, $^1/_{299}$ usw. bis $^1/_{293}$ und bevorzugt $^1/_{297}$ und $^1/_{296}$. Aus seinen dann weiter angeführten Berechnungen über die Dichte und das Material des Kerns sowie über die Dicke des Mantels ergibt sich zunächst, dass für d' also für die Dichte des Metallkerns stets Werte erhalten werden, die ein wenig über 7,8 liegen. Die Berechnung zeitigt nämlich folgende Werte für d':

ε	d'
$^1/_{300}$	8,414
$^1/_{299}$	8,343
$^1/_{298}$	8,274
$^1/_{297}$	8,206
$^1/_{296}$	8,140
$^1/_{295}$	8,075
$^1/_{294}$	8,011
$^1/_{293}$	7,949

Hier ist also zunächst die Abplattung ε des Erdellipsoids in Berücksichtigung bei der Berechnung gezogen worden. Ähnliche Werte werden aber auch erhalten, wenn eine verschiedene Dichte d des Steinmantels angesetzt wurde. Die Berechnung ergibt dann:

d =	3,0	3,2	3,4
ε	d'		
$^1/_{297}$	8,046	8,206	8,423
$^1/_{296}$	7,987	8,140	8,346

Nun ist 7,8 die Dichte des Eisens unter den Umständen, unter denen wir es gewöhnlich beobachten. Bedenkt man aber, dass die Schichten der Erde um so mehr Eisen führen, je tiefer sie liegen, dass auf die Erde teils Stein-, teils Eisenmeteoriten fallen, dass sich Eisen nach dem Ausweis des Spektroskops an dem Bau des Sonnenkörpers in sehr bedeutendem Maſse beteiligt, und nehmen wir hierzu das obige Rechnungsresultat, so wird es sehr wahrscheinlich, dass der Metallkern der Erde

hauptsächlich aus Eisen besteht, welches durch den Druck der darüber liegenden Schichten ein wenig komprimiert ist. Betrachtet man die Sache umgekehrt, so kann man nach Wiechert sagen, dass die Rechnung sehr an Bedeutung gewinnt, weil sie für den Metallkern gerade diejenige Dichte ergibt, welche aus anderen Gründen auch die grösste Wahrscheinlichkeit für sich hat.

Die Wiechertschen Berechnungen lehren weiter, dass der Gesteinsmantel etwa $^1/_5$ des Erdradius beansprucht, seine Dicke beträgt also etwa 1400 km (0,78); 1200 km (0,81) und 1600 km (0,75) sind wohl die äussersten Grenzwerte, welche noch in Betracht kommen könnten. Für die Verteilung der Schwere auf der Erdoberfläche bei den Steinmanteldichten d = 3,0, 3,2 und 3,4 erhält Wiechert folgende Werte:

ε	d = 3,0	= 3,2	= 3,4
$^1/_{300}$		7,09	
$^1/_{299}$		7,07	
$^1/_{298}$		7,05	
$^1/_{297}$	6,92	7,03	7,17
$^1/_{296}$	6,90	7,02	
$^1/_{295}$		7,01	
$^1/_{294}$		6,99	
$^1/_{293}$		6,98	

Der Mittelwert ist also hier rund = 7, somit besteht in der Erde jedenfalls mit grosser Annäherung hydrostatisches Gleichgewicht.

Wiechert beleuchtet dann weiter eingehend die Möglichkeit einer Störung dieses hydrostatischen Gleichgewichts. Wird die Hypothese dieses Gleichgewichts aufgegeben, so könnte man zunächst sowohl für die Oberfläche des Mantels, wie für diejenige des Kerns Abweichungen voraussetzen. Dabei wären die allmählichen Veränderungen zu bedenken, welche die Rotationsgeschwindigkeit der Erde wegen der Kontraktion und wegen der Reibung der Flutwelle erfährt, und es müsste angenommen werden, dass die Umgestaltungen beider Oberflächen den Veränderungen der Rotationsgeschwindigkeit nur zögernd folgen. Es gibt jedoch gute Gründe, die eine merkliche Störung des Gleichgewichts für die Oberfläche des Mantels sehr unwahrscheinlich machen. Zu diesen Punkten führt Wiechert in seinen Untersuchungen über die Massenverteilung im Innern der Erde folgendes aus. Nach dem Ausweis des Pendels variiert die Masse der Erdrinde keineswegs entsprechend den sichtbaren

Hebungen und Senkungen der festen Oberfläche, sondern scheint — wenn man sich die lokalen Unebenheiten ausgeglichen denkt — nur wenig abhängig von der äusseren Begrenzung. Bedenkt man nun, dass im Laufe der Zeiten Schichten von vielen Kilometern Dicke der Erdoberfläche teils aufgelagert, teils entführt worden sind, so muss geschlossen werden, dass bei der Ausbildung der heutigen Verhältnisse unter der festen Erdrinde eine plastische Unterlage vorhanden war, auf welcher die Erdrinde schwimmend ruhte, so dass die Massenumlagerungen sich durch Hebungen und Senkungen der Erdrinde wieder ausgleichen konnten. Als Material der plastischen Unterlage werden wir feurig-flüssige Gesteine betrachten müssen. Wenn man daher für die Oberfläche des Mantels hydrostatisches Gleichgewicht anzunehmen gezwungen ist, so steht es aber doch wesentlich anders um die Oberfläche des Kerns.

Das Wasser unterhält auch heute noch wie in früheren geologischen Epochen Massenumlagerungen auf der Erdoberfläche, und seine Arbeit hat sich seit den jüngeren Epochen wohl nicht mehr sehr viel verändert. So erscheint es also nötig, die feurig-flüssige Unterlage der Erdrinde auch heute noch anzunehmen, das beweist uns ja auch die Tätigkeit der Vulkane. Die seismographischen Untersuchungen deuten ebenfalls darauf hin, denn sie scheinen zu zeigen, dass von den Erdbebenzentren sich Erschütterungswellen längs der Erdrinde fortpflanzen, was nur möglich ist, wenn die Erdrinde durch ein nachgiebiges Polster von ihrer Unterlage isoliert ist.

Nun haben uns die Arbeiten von G. H. Darwin und W. Thomson gezeigt, dass die Erde im ganzen bei der Ebbe und Flut eine Starrheit zeigt, die derjenigen des Stahls etwa gleichkommt. Es kann somit nur eine plastische Schicht von verhältnismäfsig geringer Dicke vorhanden sein, und diese muss einen sehr starren Kern von grossen Dimensionen umschliessen. Der Unterschied in dem Verhalten von plastischer Schicht und starrem Kern mag zum Teil auf den von Wiechert angenommenen Materialverschiedenheiten in der Erde beruhen, die Hauptsache aber ist wohl, dass der nach innen zu immer weiter steigende Druck die materiellen Moleküle schliesslich so enge aneinander presst, dass sie trotz der steigenden Temperatur die gegenseitige Beweglichkeit völlig verlieren.

Nach dieser Auffassung kann der starre Erdkern schon lange vor jener Zeit bestanden haben, als die äussere Rinde zu erstarren begann, und es scheint daher möglich, dass früher durchlaufene Rotations-

geschwindigkeiten ihre Spuren in merklichen Abweichungen der Gestalt des Kerns von der Gleichgewichtsfigur hinterlassen haben.

Des weiteren stellt Wiechert Berechnungen an für den Fall einer Störung des hydrostatischen Gleichgewichts. Er führt zunächst die verschiedenen Beobachtungsergebnisse über die Abplattung der Erde an und gelangt dazu, dass wir als das Gesamtresultat aller heute vorliegenden Beobachtungen $^1/_{297}$ als richtig ansehen können. Die Abplattung des Kernes wäre also um etwa $^1/_{40}$ geringer als die der Niveaufläche gleichen Inhalts; der Kern überragt somit die Niveaufläche an den Polen um etwa 280 m und läge am Äquator um etwa 140 m tiefer. Bei unveränderlicher Gestalt des Kernes und völliger Nachgiebigkeit der äusseren Begrenzung der Erde müsste dann die Rotationsgeschwindigkeit um etwa $^1/_{44}$ kleiner werden, um auch für die Oberfläche des Kernes hydrostatisches Gleichgewicht festzustellen.

Durch die Kontraktion der Erde infolge ihrer Abkühlung wird aber die Rotationsgeschwindigkeit beschleunigt, durch die Reibung der Flutwelle jedoch wieder verzögert. Je weiter die Erstarrung der Erde fortschreitet, um so mehr tritt der verzögernde Einfluss der Flutwelle hervor. Man nimmt an, dass er heute schon überwiegt, dass die Umdrehungszeit der Erde $T = 86\,164{,}1$ Sekunden zunimmt. Das erhaltene Resultat, dass die zum hydrostatischen Gleichgewicht gehörende Rotationszeit des Kerns T_K grösser ist als T, sagt demgemäſs aus, dass die heutige Abweichung des Kerns von der Gleichgewichtsfigur noch aus jener schon vergangenen Periode stamme, in welcher der Einfluss der Abkühlung überwog. Die bedeutende Grösse von $T_K - T$ nötigt uns sogar, in dieser Periode sehr weit zurückzugehen, denn wie eine einfache Berechnung zeigt, muss die Steinschicht damals um mehr als $^1/_6$ dicker gewesen sein als heute, also sehr viel heisser, — aussen schwerlich schon erstarrt, vielleicht sogar noch gasförmig. Der Erdkern muss demnach durch ungeheure Zeiträume hindurch deformierenden Kräften widerstanden haben.

Wiechert geht also von der Vorstellung aus, dass die Dichtenunterschiede in der Erde in der Hauptsache durch Materialverschiedenheiten verursacht werden. Bei dieser Anerkennung muss unter dem Mantel von Gesteinen, auf dem wir wohnen, ein Metallkern angenommen werden. Um die Rechnung möglichst einfach zu gestalten, wird sowohl für den Mantel wie auch für den Kern die Dichte durchweg konstant gesetzt, wodurch sich dann für den Kern gerade diejenige Dichte ergibt,

die aus vielerlei Gründen schon von vorne herein erwartet werden muss, nämlich: die Dichte des komprimierten Eisens. Die Rechnung gelangt dahin, indem sie ausgeht von dem bekannten Werte der mittleren Dichte der Erde und der wenigstens ungefähr angebbaren Dichte des Gesteinsmantels. Dabei wird beachtet, dass sich jedem vorgegebenen Wert für die Dichte des Kerns eine bestimmte Grösse des Kerns und eine bestimmte Abplattung der Erde zuordnet. So erlaubt die wirklich vorhandene Abplattung der Erde einen Schluss auf Dichte und Dimensionen des Kerns. Da die Rechnung sich in bezug auf die Dichte bewährt, so wird sie auch bezüglich der Kerndimensionen Gültigkeit besitzen. Wir erhalten darum das Resultat, dass die Erde aus einem Eisenkern von etwa 10 Millionen Metern Durchmesser besteht, den ein Gesteinsmantel von etwa $1^1/_2$ Millionen Metern Dicke umgibt. Der Mantel beansprucht etwa $^1/_5$ des Erdradius. Dem Volumen nach kommt er dem Kern etwa gleich, der Masse nach steht er weit zurück, etwa im Verhältnis 2:5.

Eine weitere Beachtung zur Lösung der grossen Frage nach dem Zustande des Inneren unserer Erde bietet uns die Erscheinung von Ebbe und Flut.

Wir leben an der Grenze zweier Meere, am Boden des Luftmeeres und über dem tropfbar flüssigen; die äussere Grenze des ersteren können wir nicht erreichen, denn die höchsten Gebirge sind nur Untiefen desselben, welche von ihm weit überströmt werden; von dem zweiten ist uns nur die Oberfläche bekannt, die Geheimnisse der Tiefe sind uns verschlossen. Auf diese Weise ist der grösste Teil der festen Erdoberfläche unseren Blicken entzogen. Allerdings ragen mächtige Landmassen über das Meer hervor, so dass die feste Grundfläche des Luftkreises zur flüssigen sich wie 51 : 146 verhält, aber man ist längst von der Vorstellung zurückgekommen, dass das über den Meeresspiegel Erhobene ausreichen würde, die Lücke auszufüllen, welche wir in den jetzigen Umrissen der Erde entstehen sehen würden, wenn es gelänge, das Meer völlig auszuschöpfen.

Denken wir uns aber auch die Voraussetzung der Ausschöpfung erfüllt, alle Seen vertrocknet, alle Flüsse versiegt, so würden wir doch irren, wenn wir meinten, es nun nur mit einem Starren zu tun haben. Denn die rasch nach innen zunehmende Wärme führt, oder führte, zu dem Schluss, dass in verhältnismäfsig nicht erheblicher Tiefe dasjenige, was an der Oberfläche fest ist, in der Glut dieses Inneren

flüssig wird, dass die feste Schale, die diesen flüssigen Kern umgibt, noch nicht im Verhältnis der Dicke einer Eierschale zu dem Inhalt des Eies ist, ja so schwach, dass man schon mehrfach die Ansicht ausgesprochen hat, sie vermöge nicht eine so mächtige Last wie das Himalajagebirge zu tragen. Man nimmt an, dass dieses grosse asiatische Gebirge im flüssigen inneren Meer schwimme wie Eis im Wasser, freilich eine mächtige Scholle, da sie mehr als eine Meile über das äussere Wassermeer hervorragt. Es liegt daher die Ansicht nahe, dass dieses Überwiegen des Flüssigen über das Feste früher in noch höherem Maſstabe stattgefunden habe, dass einst die ganze Erde flüssig war.

Die Grundeigenschaft einer Flüssigkeit ist die leichte Beweglichkeit ihrer Teile, welche jeder Kraft folgen, die sie zur Bewegung antreibt. Wirkt auf diese Flüssigkeit keine äussere Kraft, so bleibt für die einzelnen Teile derselben nur ihre gegenseitige Anziehung übrig, sie bildet daher eine Kugel, weil diese Gestalt der Bedingung der grössten Annäherung aller einzelnen Teile entspricht. Fällt Wasser, so kann die Schwere keinen formbestimmenden Einfluss auf dasselbe äussern, da alle Teile eines fallenden Körpers sich gleich schnell bewegen. Hier tritt also die Kugelgestalt unmittelbar in der Form des Tropfens hervor.

Man kann nun sehr treffend auch die Erde einem fallenden Tropfen vergleichen. Das ist dann sogar nicht ein Vergleich allein, sondern die Wirklichkeit, nur geschieht dieser Fall nach der Sonne hin. Das Wort «fallen» ist dabei im Sinne Newtons aufzufassen, dass die Schwere auf Bewegtes so wirkt, wie auf Unbewegtes. Die Sonne zwingt die Erde — welche gradlinig fortzufliegen das Bestreben hat — immer von der Tangente ab nach ihr hinzufallen und auf diese Weise entsteht statt der gradlinigen Bahn eine kreisförmige. Alle Wirkungen der Kräfte nehmen aber ab mit zunehmender Entfernung. Der der Sonne zugekehrte Punkt der flüssigen Erde fällt also am weitesten von der gradlinigen Berührungslinie ab, der Mittelpunkt weniger, der abgekehrte Punkt am wenigsten. Dadurch entfernt sich sowohl der zugekehrte als auch der abgekehrte Punkt am Zentrum. Die flüssige Erde wird dadurch ein verlängertes Sphäroid, dessen lange Axe der Sonne zugekehrt ist. Da unsere Erde nun weder ganz flüssig, noch ganz fest ist, so wird das flüssige Wasser sein Sphäroid auf der unverändert bleibenden festen Kugel bilden, d. h. es wird sich an der der Sonne zugewendeten, wie auch an der von ihr abgewendeten Seite anhäufen und von den Seiten nach beiden Stellen hin abfliessen. Aber indem

die Erde sich dreht, ändert der fluterzeugende Körper seine Stellung, ehe das Sphäroid, welches er in der flüssigen Hülle der Erde zu erzeugen suchte, zu Stande gekommen ist. Dadurch entsteht eine Welle, welche dem Gestirn in seinem scheinbaren Umlauf um die Erde folgt. Das flüssige Sphäroid bleibt daher stehen über der unter ihm sich drehenden festen Kugel, jeder Ort kommt daher binnen 24 Stunden zweimal an die Stelle des sich verflachenden bzw. des sich erhöhenden Wassers. Man nennt diese Erscheinung: Ebbe und Flut.

Man hat nicht nur der Sonne zu gedenken, sondern auch des Mondes, zu dem sich die Erde verhält, wie die Sonne zu uns. Aber jede Anziehung ist eine gegenseitige, der Mond fällt also nicht nur nach der Erde, sondern auch die Erde nach dem Monde, d. h. sie geht schneller, wenn er in ihrer Bahn vor ihr steht, langsamer, wenn er hinter ihr ist, sie biegt seitwärts aus der Bahn, wenn er zur Seite tritt. Aus denselben Gründen, aus welchen die Sonne eine Flut hervorruft, erzeugt also auch der Mond eine Flut. Stehen alle drei Körper, Sonne, Mond und Erde, in einer geraden Linie, also bei Voll- und bei Neumond, so fällt die Sonnenflut an dieselbe Stelle, als die durch den Mond bedingte, hier steigt somit das Wasser aus zwei Gründen, daher höher. Da der Mond jeden folgenden Tag 50 Minuten, also fast eine Stunde später aufgeht, tritt auch die Mondflut täglich eine Stunde später ein. Nach einer Woche fällt demnach die Mondflut mit der Sonnenebbe zusammen und erst nach vierzehn Tagen werden Sonnen- und Mondflut auf dieselbe Stelle wirken und Springflut hervorrufen. Man könnte nun glauben, dass die Mondflut verhältnismäfsig kleiner sein würde, da der Mond 160 mal schwächer zieht als die grosse, wenn auch weit entfernte Sonne. Dies würde auch sein, wenn die ganze Anziehungskraft der Gestirne auf die Erzeugung der Flut verwendet würde, aber ihre fluterzeugende Kraft ist nur der Unterschied ihrer Wirkungen auf die Oberfläche und den Mittelpunkt der Erde. Bei dem nahen Mond ist ein Erdhalbmesser mehr oder weniger darum eine viel erheblichere Sache, als bei der Sonne, denn diese ist 12 000 Erddurchmesser entfernt, der Mond aber nur 30. Ein Dreissigstel der Mondkraft verhält sich aber zu dem zwölftausendsten Teile der Sonnenkraft wie 5 : 2, oder genauer wie 50 : 19; daher steigt das Meer unter dem Einfluss der Sonne 2 Meter, wenn es unter dem Einfluss des Mondes sich um 5 Meter erhebt. Bei Springfluten steigt das Meer daher 5 + 2 also 7 Meter, wenn es bei Nippfluten 5 — 2, d. h. 3 Meter steigt.

Wäre die Erdoberfläche mit einem gleich tiefen Meere überall bedeckt, so würde eine sehr breite Doppelwelle die Erde von Ost nach West innerhalb 25 Stunden umkreisen, die am Äquator am höchsten, nach den Polen hin sich vollständig abflachen würde. Annähernd zeigt sich dies in dem südlichen Ozean, wo das Land fast ganz zurücktritt. Aber wesentlich verschieden wird die Erscheinung von Ebbe und Flut im stillen Ozean, dem indischen Meere und dem atlantischen Ozean. Untersuchungen haben dabei ergeben, dass tatsächlich die Flut in Amerika von Osten kommt, aber in Afrika und Europa von Westen.

Ob das innere feuerflüssige — wie man es bisher stets bezeichnet — Meer auch flutet, oder ob es zu zähflüssig dazu ist, wissen wir nicht. Wie das Meer am Ufer, so arbeitet es vielleicht drängend oder zerstörend an der festen Schale, auf der wir oft genug deutlich Wellen fortschreiten sehen, die wir Erdbeben nennen. Biegsam ist diese Schale gewiss. Steigt doch Schweden vor unseren Augen langsam aus dem Meere hervor, das von seinen Küsten fortwährend zurückweicht, während an den pommerschen Küsten keine solche Veränderung sich zeigt. An anderen Stellen, wie in Istrien, sinkt dagegen das Land. Durch Darvin ist es wahrscheinlich geworden, dass die Sage von einer versunkenen Atlantis sich im grossen, im stillen Ozean verwirklicht. Hier, wo das grosse australische Korallenriff, das einst doch wohl die Festlandsküste berührte, jetzt in meilenweitem Abstand von derselben auf hunderte deutsche Meilen Länge in grossem Bogen die Umrisse der Küste wiederholt und wo hunderte von Korallenringen noch den Umfang der Inseln bezeichnen, die längst unter das Wasser herabgesunken sind. Auf dem sinkenden Boden bauen die Korallentiere immer rüstig weiter, um mit der Oberfläche des Meeres in Berührung zu bleiben. Ihre Tätigkeit wird erst dann begrenzt, wenn der Meeresboden sich hebt und trocken gelegt wird. Deutlich zeigt uns diesen Vorgang die rauhe Alp und das Juragebirge, die wie ein grosser Wall sich von der südwestlichen Schweizergrenze bis in die Gegend von Bayreuth erstrecken.

Alle unsere früheren Anschauungen über die Ursachen und die Wirkungen von Ebbe und Flut beruhten auf der Annahme, dass unsere Erde, etwa schon in einer Tiefe von 200 km, flüssig oder gar gasförmig sei. Diese Annahme erhielt ihren ersten Stoss durch die Untersuchungen von Lord Kelvin (William Thomson) über Ebbe und Flut und die neueren Darlegungen von G. H. Darvin über den gleichen Gegenstand.

Die Beobachtung der beiden grossen Gezeiten, die wir allgemein unter den Begriffen Ebbe und Flut zusammenfassen, führt zu interessanten Schlüssen über die Festigkeit der Erde.

Wenn man annimmt, dass die Erde überall von gleicher Dichtigkeit und Nachgiebigkeit sei, wie es das Wasser ist, dann wäre überall auf unserer Erde sehr starke Flut und Ebbe. Indessen wäre man nicht in der Lage, diese Erscheinungen zu beobachten, da doch alle Teile, die gleich weit vom Erdmittelpunkte entfernt liegen, durch Sonne und Mond gleich stark gehoben und gesenkt würden. Ferner, wäre die Erde im Innern gasförmig und hätte sie nur eine dünne Schale, den Gesteinsmantel, so müssten die Kontinente ebenfalls sehr starke Ebbe und Flut besitzen, und das Meer könnte sich infolgedessen ebenfalls nur wenig höher heben oder nur wenig tiefer senken als das Festland. Es wäre dann also überall nur sehr geringe Ebbe und Flut zu beobachten.

Die immer genauer durchgeführten Beobachtungen der Gezeiten zeigen nun, dass die Fluthöhe, wie sie für eine völlig starre Erde berechnet wurde, nicht vollständig erreicht wird, dass vielmehr die feste Erde selbst die Hebung und Senkung ein wenig mitmacht. Diese Erdbewegung beträgt jedoch nur soviel, als ob die Erde im Mittel etwa ebenso nachgiebig wäre wie Stahl.

Um dieses Problem eingehend zu untersuchen, hat O. Hecker in Potsdam an einem hierzu besonders gebauten Apparate direkt die Ebbe- und Flutbewegungen der festen Erde gemessen. Er fand ebenfalls, dass die Nachgiebigkeit der Erde gegenüber der Anziehungskraft des Mondes etwas grösser sei als die Nachgiebigkeit einer Stahlkugel von der Grösse der Erde.

Um die Deformationen des Erdkörpers unter dem Einfluss von Sonne und Mond hat O. Hecker Jahre hindurch Beobachtungen am Horizontalpendel in Potsdam angestellt zum Studium der Schwankungen des Lotes unter dem Einfluss der beiden Gestirne. Die Deformationen, welche der Erdkörper unter dem Einfluss von Sonne und Mond erleidet, sind nun zweierlei Art; es sind nämlich zu unterscheiden: die Deformationen, welche nur die oberen Teile der Erdkruste erfahren und die, welche der ganze Erdkörper erleidet. Die zuerst genannte Art von Deformation äussert sich in scheinbaren Schwankungen des Lotes; die Richtung der Schwere bleibt dieselbe und nur die Lage der Scholle gegen sie ändert sich. Die bemerkenswerteste Störung dieser Art ist

die tägliche Periode der Bewegung der Pendel infolge der Sonnenbestrahlung. Ihre Wirkung ist nur sehr oberflächlich, da sie bei Sandboden — wie Potsdam ihn hat — schon in 25 m Tiefe auf etwa $^1/_7$ des Betrages, den sie an der Oberfläche hat, herabsinkt.

Die zweite Art von Deformation aber, die der ganze Erdkörper erleidet, kennzeichnet sich durch wahre Bewegungen des Lotes, die eine Folge der Attraktionswirkung von Sonne und Mond sind. Bei der Annahme einer absolut starren Erde würden diese Bewegungen ihr Maximum erreichen. Wenn dagegen der Erdkörper mit der Freiheit einer vollkommenen Flüssigkeit nachzugeben vermöchte, so würden diese Bewegungen verschwinden, da sich dann die Oberfläche so anordnet, dass die wahre Richtung der Schwere stets senkrecht auf ihr steht.

Die Heckerschen Beobachtungen ergaben nun, dass der Erdkörper unter der anziehenden Wirkung sowohl des Mondes, als auch der Sonne etwas nachgibt, aber doch der Deformation einen grossen Widerstand entgegensetzt. Die Bewegungen des Lotes haben etwa $^2/_3$ des Betrages, den sie bei einer absolut starren Erde haben würden. Auch hieraus wieder kann man nach Lord Kelvins Untersuchungen schliessen, dass der Erdkörper sich ungefähr wie eine gleich grosse Kugel aus Stahl verhält.

Die Beobachtungen in Potsdam führen weiter zu dem Schluss, dass die Starrheit des Erdkörpers in der meridionalen Richtung geringer ist, als in der des Parallels. In der zuerst genannten Richtung entspricht der Starrheitskoeffizient etwa dem des Glases; im Parallel ergibt er sich als zwischen dem des Kupfers und dem des Stahls liegend. Hypothesen aufzustellen über den Grund dieser Erscheinung, von der noch nicht festzustellen ist, ob sie einen regionalen, speziell das Beobachtungsgebiet betreffendem Charakter hat, oder ob es sich vielleicht um ein mit der Rotation der Erde (Lord Kelvin) zusammenhängendes, allgemein gültiges Gesetz handelt, erscheint verfrüht. Die Beobachtungen anderer geodätischer Institute stehen jedoch mit dem in Potsdam erhaltenen Resultat in gutem Einklang.

Was die Phase der Deformationswelle angeht, so hat sie sich als sehr klein ergeben. Hiernach ist also die innere Reibung bei der Deformation des Erdkörpers als sehr gering anzunehmen.

Die Grösse der Ablenkung, welche das Lot unter der Einwirkung von Sonne und Mond erfährt, ist besonders seit Einführung des Horizontalpendels der Gegenstand eingehender Untersuchungen gewesen. Während

die Bestimmung des Gravitationseinflusses des Mondes trotz seines geringen Betrages relativ leicht möglich ist, so ist eine sichere Bestimmung des rund halb so grossen Einflusses der Sonne nur dann gut möglich, wenn man das Pendel in grösserer Tiefe aufstellen kann, was in Potsdam in 25 m Tiefe geschah. Würde man das Horizontalpendel an oder nahe der Erdoberfläche aufstellen, so tritt eine Fehlerquelle systematischer Natur hinzu, nämlich die Wirkung der Sonnenstrahlung auf den Erdboden, wodurch das Pendel in periodische Schwankung gerät, die mehr als den fünfzigfachen Betrag der Gravitationswirkung der Sonne erreichen kann.

Der Einfluss, den die Sonne auf die Stellung der Pendel ausübt, ist auf zweierlei Ursachen zurückzuführen, nämlich auf eine Wirkung, die in noch nicht genau bekannter Weise mit der Wärmestrahlung der Sonne zusammenhängt, und auf die Anziehungskraft der Sonne. Der grössere Einfluss wird durch die Wärmestrahlung verursacht. Diese Wärmestrahlung bewirkt eine Deformation der Scholle in den der Oberfläche nahen Schichten der Erdrinde und damit eine periodische tägliche Wanderung des Pendels. Diese Wanderung kann, wie gesagt, um das 50fache zu gross ausfallen. Mit wachsender Tiefe nimmt jedoch dieser Einfluss der Wärmestrahlung auf die Pendelbewegungen rasch ab.

Dagegen ist die Einwirkung des Mondes auf die Pendel mit weit grösserer Genauigkeit festzustellen. Infolge der raschen Änderung der Stellung von Mond und Sonne zueinander hebt sich ein grosser Teil der unregelmäfsigen Bewegungen, wie sie die Sonne hervorruft, heraus, wenn man die Beobachtungen nach Mondstunden zusammenfasst. Darum bedient man sich am bequemsten für eine solche Untersuchung des Mondeinflusses der Methode, wie sie bei der Bearbeitung der Gezeitenbeobachtungen des Meeres üblich ist. Diese Methode ist von Prof. Dr. Boergen in seiner Arbeit «Die harmonische Analyse der Gezeitenbeobachtungen» angegeben. Die Pendel führen nämlich eine Bewegung aus, deren Periode, wie bei der Ebbe und Flut des Meeres, ein halber Tag ist. Es sind also schon — bei Benutzung der Boergenschen Methode — in nur rund einen Monat umfassenden Beobachtungsabschnitten die Unregelmäfsigkeiten der Nullpunksbewegung der Pendel, sowie der Sonneneinfluss, genügend weit ausgeglichen, dass sich die Einwirkung des Mondes klar darstellt.

Die Bestimmung der unter dem Einflusse des Mondes auftretenden Gezeiten des Erdkörpers ist also mit wesentlich höherer Genauigkeit

auszuführen, als die Ermittelung der durch die Sonnenwirkung hervorgerufenen Gezeiten. Dass die Einwirkung des Mondes auf die Pendel sicherer zu bestimmen ist, beruht darauf, dass sich infolge der Änderung der Stellung von Mond und Sonne die Fehler, die durch den Wärmeeinfluss der Sonne hervorgerufen werden, überdecken und im Mittel herausfallen, wenn man die einzelnen Mondstunden für einen grösseren Zeitraum zusammenfasst. Man erhält auf diese Weise bei den Pendelbeobachtungen in ihrem Endresultat Ausdrücke, in denen die fluterzeugende Kraft des Mondes in sehr klarer und wenig durch andere Einwirkungen beeinflusster Weise zu erkennen ist.

Hecker hat dann des weiteren untersucht, wie sich die beobachtete, unter dem Einfluss des Mondes erfolgende Schwankung des Lotes zu der Schwankung verhält, die es erleiden würde, wenn die Erde absolut starr wäre. — Wenn der Erdkörper im Mittel vollständig elastisch wäre, so müsste bei der Deformation, die er durch Mond und Sonne erleidet, die Scholle der Änderung der Niveaufläche folgen. Die Horizontalpendel würden also keine Bewegung zeigen. Dies gilt jedoch nur für die Oberfläche eines homogenen Erdkörpers mit vollkommener Elastizität, nicht aber für die Meeresoberfläche.

Die Beobachtungen an den Horizontalpendeln ergeben nun, dass die Ablenkung des Lotes unter dem Einfluss des Mondes geringer ist, als sie bei einem vollkommen starren Erdkörper sein würde. Sie beträgt etwa $^2/_3$ derselben. Es zeigt sich somit also, dass der feste Erdkörper zwar etwas nachgibt, aber doch einer Deformation einen sehr grossen Widerstand entgegensetzt. Die vielfachen Beobachtungen ergeben auch hier wieder, dass die Erde sich verhält wie eine gleich grosse Kugel aus Stahl.

Nicht nur der Mond, sondern ebenfalls die Sonne bewirkt eine Ablenkung des Lotes von halbtägiger Periode, wie die Beobachtungen auch ergeben haben. Der Koeffizient der beobachteten Sonnenwelle ist, ebenso wie beim Monde, gleich annähernd $^2/_3$ des für eine starre Erde theoretisch ermittelten. — Die Endresultate der Potsdamer Beobachtungen ergaben nämlich (t bezeichnet die Mondzeit):

für die Sonnenwirkung:

Berechnete Anziehung $0'',00399 \cos(2\,t - 305^0,5)$,

Beobachtete Sonnenwelle $0'',00244 \cos(2\,t - 273^0,6)$,

und für die Mondwirkung:

Berechnete Anziehung $0'',00922 \cos (2t - 305^0,5)$,
Beobachtete Mondwelle $0'',00622 \cos (2t - 285^0,4)$.

Trotz der Grösse und Unregelmäſsigkeit der täglichen Periode der Sonnenwelle ergeben somit die Beobachtungen die durch den Einfluss der Sonne verursachten Gezeiten des festen Erdkörpers in unzweideutiger Weise. Auch die tägliche Ungleichheit der Mondwelle, deren Grösse durch die geographische Breite des Beobachtungsortes (Potsdam) und durch die Deklination des Mondes gegeben sind, ist also durch die Beobachtungen nachweisbar.

Es drängt sich nun die Frage auf, ob die beobachtete Mondwelle nur auf die Einwirkung des Mondes auf das Horizontalpendel zurückzuführen ist, oder ob nicht auch andere Ursachen das Pendel beeinflussen. Solche Störungen können z. B. bewirkt werden durch Änderungen in der Massenverteilung der Erde, wie auch durch den Transport von Massen an der Erdoberfläche. Es kommt hier besonders die ebenfalls durch den Mond verursachte Ebbe und Flut des Meeres in Betracht; für Potsdam also die Nordsee, ein angenähert kreisrundes Becken von etwa 350 km Radius, das eine beträchtliche Ebbe und Flut zeigt. In dem gegen 800 km von dem Mittelpunkte der Nordsee entfernten Potsdam beträgt für ein Steigen des Nordseewassers theoretisch die Anziehung des Lotes nur noch 0,0006 Bogensekunden. Aber auch dieser Einfluss ist praktisch noch nicht einmal anzunehmen. Man wird also ohne grossen Fehler die Beeinflussung des Pendels durch die Gravitationswirkung infolge der Anstauung der Wassermasse der Nordsee bei der Flut und des Ablaufens derselben bei Ebbe, und ebenfalls die Biegung der Erdkruste durch die eintretende Belastung und darauf folgende Entlastung als gering veranschlagen können. Ob Ebbe und Flut im atlantischen Ozean etwa Einfluss auf das Pendel ausüben, ist zwar vorläufig noch nicht mit Sicherheit festgestellt, doch kann nach der Gezeitenkarte des atlantischen Ozeans dieser Einfluss ebenfalls nur sehr gering sein.

Eine sehr merkwürdige Erscheinung, die sich aus den Beobachtungen ergibt, nämlich eine starke Asymmetrie der Gezeitenwelle bei grosser nördlicher und südlicher Deklination des Mondes, lässt sich vorläufig nicht mit Sicherheit erklären. Diese Abweichung von der durch die Theorie über die innere Reibung geforderten Phase ist bei der eintägigen Mondwelle sehr gross. Sie beträgt in der

		N—S-Richtung:	O—W-Richtung
Deklination	+ 18°,5 .	— 28°,7	— 32°,8
»	— 18°,4 .	— 50°,0	— 15°,8
Mittel		— 39°,3	— 24°,3

Worin sie ihren Grund hat, ob in Einflüssen, die lokaler Natur und der Station eigentümlich sind, oder ob es sich um Störungen regionaler Art handelt, die vielleicht durch Besonderheiten in der Konstitution der Erdrinde, den Aufbau der Festlandsmasse, die Erstreckung der Kontinente zu erklären sind, darüber lassen sich nur Vermutungen aufstellen. Die Beobachtungen an einer einzigen Station (Potsdam) sind hier nicht entscheidend. Von der Hand zu weisen ist die Vermutung nicht, dass infolge der ungleichmäſsigen Dichtigkeit der oberen Schichten der Massen der Erdkruste ein solcher Einfluss vorhanden ist. Wie wir jetzt durch die Untersuchungen Helmerts, über die Schwerkraft und die Massenverteilung der (Enzyklopädie der math. Wissenschaften VI, 1. Bd., Heft 2, Leipzig 1910), über die Tiefe der Ausgleichsfläche, abgeleitet aus den auf der Erde beobachteten Störungen der Schwerkraft wissen, erstreckt sich die Ungleichförmigkeit der Massenverteilung der Erdkruste bis in die Tiefe von 120 km. Amerikanische Forscher fanden einen nahezu übereinstimmenden Betrag. Diese Ungleichförmigkeit ist unterhalb der Kontinente eine andere, wie unter den Ozeanen und die Elastizitätsverhältnisse der Schichten bis zu dieser Tiefe müssen dementsprechend verschieden sein.

Durch die fluterzeugende Kraft des Mondes oder der Sonne wird an der Oberfläche einer absolut starr gedachten Erde eine Bewegung des Lotes hervorgerufen. Diese Attraktion eines Himmelskörpers bringt nun eine Bewegung hervor, die sich aus einer eintägigen und einer halbtägigen Periode zusammensetzt und die in der N—S-Komponente ausserdem noch ein Glied enthält, das von der Breite des Beobachtungsortes und der Deklination des Himmelskörpers abhängt, und das bei einer nicht starren Erde eine konstante Aufwölbung am Äquator hervorruft, die jedoch nur sehr klein ist.

Wenn sich der Himmelskörper im Äquator befindet, so verschwindet das eintägige Glied, da dann ja die Deklination des Himmelskörpers = 0 ist. Auch wenn der Mond nicht im Äquator, sondern in nördlicher oder südlicher Deklination steht, muss das Verhältnis der beiden entsprechenden Achsen der halbtägigen Periode gleich sinus φ sein.

Für Potsdam, wo $\varphi = 52^0\ 23'$ ist, ergibt sich also sinus $\varphi = 0{,}79$. Nun haben aber die dortigen Beobachtungen der Bewegung des Lotes unter dem Einfluss des Mondes folgende Maximalamplituden ergeben:

	Richtung N—S	Richtung O—W	N—S : O—W
Nördliche Deklination .	0″,00356	0″,00594	0,60
Südliche Deklination .	0″,00337	0″,00622	0,54
		Mittel . .	0,57
		Nach der Theorie . .	0,79.

Das Verhältnis der Achsen ergibt sich also sowohl bei der nördlichen, als auch bei der südlichen Deklination des Mondes als erheblich zu *klein im Vergleiche zur Theorie.*

Für die Sonne können wir das Verhältnis der beiden Achsen der halbtägigen Lotbewegung nach den Beobachtungen nicht mit genügender Sicherheit bestimmen. Die starke Abweichung der Phase bei den Pendelbeobachtungen von der von der Theorie geforderten zeigt, dass die *Beobachtung der halbtägigen Sonnengezeiten von den Unregelmäfsigkeiten* der täglichen Periode des Sonneneinflusses und anderen täglich sich wiederholenden Einflüssen stark gefälscht wird. Immerhin lässt sich mit voller Sicherheit feststellen, dass unter dem Einfluss der Sonnen anziehung halbtägige Gezeiten des festen Erdkörpers auftreten.

Aus allen zu Potsdam *registrierten Beobachtungen ergibt sich nun,* dass man als Maximalamplituden der Lotbewegung für die halbtägige Bewegung des Mondes erhält

	für die N—S-Komponente	für die O—W-Komponente
berechnet	0″,00788	0″,00999
beobachtet	0″,00355	0″,00665.

Es ist somit das Verhältnis der beobachteten Lotbewegung zu der von der Theorie für eine absolut starre Erde geforderten bei der N—S-Komponente = 0,43 und bei der O—W-Komponente = 0,68.

Aus diesen Pendelbeobachtungen hat dann O. Hecker die Starrheitskoeffizienten des Erdkörpers für die N—S- und für die O—W-Richtung, auf Grund der Wiechertschen Hypothese über den Aufbau des Erdkörpers bestimmt und zwar für den besonderen Fall, dass die Starrheit der Erdkruste die gleiche ist, wie die des Kerns. Wir erhalten so also die mittlere Starrheit des ganzen Erdkörpers in den beiden Richtungen. Hiernach ergeben sich aus den Potsdamer Beobachtungen die folgenden Starrheitskoeffizienten:

Richtung N—S	Richtung O—W
$1{,}8 \times 10^{11}$ cgs	$6{,}2 \times 10^{11}$ cgs.

Die Starrheitskoeffizienten in den beiden Richtungen zeigen somit eine sehr grosse Verschiedenheit; in der N—S-Richtung ist die Starrheit des Erdkörpers wesentlich geringer als die in der O—W-Richtung. Wenn man, sinngemäfs, diese Resultate mit denjenigen anderer, älterer und neuerer, Beobachtungsstationen vergleicht, so führt die gute Übereinstimmung zu dem Schlusse, dass für das Gebiet, auf welches sich die Beobachtungen erstrecken, die Starrheit des Erdkörpers in der meridionalen Richtung als kleiner angenommen werden muss als in der des Parallels.

Worin die Verschiedenheit liegt, ist nicht recht klar; ob in einer besonderen Eigentümlichkeit des Beobachtungsgebietes, oder wie Lord Kelvin meint, dass diese Erscheinung mit der Rotation der Erde in Verbindung stehe. Aus den Beobachtungen Heckers zu Potsdam, die durch Beobachtungen Orloffs in Dorpat bestätigt werden, können wir aber den sicheren Schluss ziehen, dass die innere Reibung bei der Deformation des Erdkörpers als sehr klein betrachtet werden kann.

In jüngster Zeit hat man die Frage nach der Konstitution des Erdkörpers vielfach mit ganz neuen Mitteln zu lösen versucht. Die Erscheinung von Ebbe und Flut, veranlasst durch die Anziehung des Mondes und in untergeordneter Weise auch durch die der Sonne, ist nur denkbar auf einem Erdkörper, der einen hohen Starrheitsgrad besitzt. Aus dem Zahlenmaterial über die vierzehntägigen und ganzmonatigen Fluten verschiedener Höhen aus 33 Beobachtungsjahren hatte schon G. H. Darwin in seinem bereits zitierten Werk über »Ebbe und Flut« (S. 257) erkannt, dass die Fluthöhen nur ein Drittel geringer sind, als sie sein müssten, wenn die Erde ein absolut starrer Körper und nur das Wasser auf ihr beweglich wäre. Der aus dieser Differenz sich ergebende Widerstandsgrad der Erdkruste gegen Formveränderung entpricht dem des Stahls. Die Erde verhält sich gegenüber der Anziehungskraft des Mondes etwa so, als ob sie ganz aus Stahl wäre. Die vorhin des näheren angeführten Beobachtungen Heckers an dem Pendel, wobei es sich um Pendelausschläge von Millimeterbruchteilen handelt, leiten zu demselben Resultate hin.

Ebenso gibt es noch mehrere andere Methoden, den Starrheitsgrad der Erde zu berechnen, bei denen auch z. B. die Nutation, d. i. die vom Monde erzeugte regelmäfsige Polschwankung wertvolle Hülfe zu leisten vermag. Diese Polschwankungen sind im Jahre 1835 zuerst von Kästner sicher nachgewiesen und später von Chandler zuerst genauer

untersucht worden. Die Polschwankungen entstehen dadurch, dass die Achse, um welche sich die Erde dreht, nicht durch den von uns als Pol bezeichneten Punkt geht, sondern unregelmäfsige Kurven um diesen Pol herum beschreibt, wobei sie sich zeitweise bis zu zehn Metern von dem Pole entfernt. Unter der Annahme einer absolut starren Erde hatte schon der Mathematiker Euler (1707 bis 1783) die Nutation, also die vom Monde erzeugte regelmäfsige Polschwankung auf 305 Tage berechnet, Chandler auf 427 und Kimura auf 436 Tage. Aus den weiter fortgeführten und noch jetzt fortdauernden, feinen Beobachtungen ergaben sich 437 Tage als wahre Umlaufszeit der Erdachse um den Pol. Der durch die Zentrifugalkraft infolge der Erddrehung nach dem Äquator hin erzeugte Wulst wird vornehmlich vom Monde derart angezogen, dass eine Verlegung der Stellung der Erdachse herbeigeführt wird in dem Sinne, dass die Achse in 26000 Jahren einen Kegelmantel umschreibt; der Pol, das Ende der Achse, beschreibt also einen Kreis von zwar nicht gänzlich mathematisch genauer Form. Diese Kraft, welche die Erdachse zur Durchlaufung des Kegelmantels zwingt, wirkt dauernd, und dauernd geht somit die Erdachse nicht durch den idealen Pol, sondern in einem Kreise darum herum. Der äquatoriale Wulst müsste sich infolge dieser Verlegung der Erdachsenrichtung anders, nämlich senkrecht zur Lage einstellen, was leicht möglich wäre, wenn die Erde flüssig sei. Es hat sich nun aber durch genaue astronomische Untersuchungen von Chandler bei der 437 tägigen Umlaufszeit gezeigt, dass der Erdkörper als Ganzes den Kräften gegenüber, welche die Polschwankungen verursachen, etwas weniger nachgiebig sei, als wenn er aus Stahl bestände.

Das Interesse für die zeitlichen Änderungen der mathematischen Gestalt und die Nachgiebigkeit der festen Erde gegen äussere Kräfte ist besonders durch die Arbeiten von Lord Kelvin und G. H. Darwin belebt worden. Vom Standpunkt der Geodäsie ist das Problem zusammenfassend von F. R. Helmert in seinen Theorien der höheren Geodäsie behandelt. Für die Beurteilung der Elastizität der Erde als Ganzes ist u. a. die Messung der Grösse der Richtungsänderung der Schwerkraft durch die Flutkraft des Mondes wichtig. Die ersten Versuche, diese Lotablenkung festzustellen, stammen von G. H. und H. Darwin. Von Erfolg waren aber erst die Beobachtungen von E. Rebeur-Paschwitz in Strassburg an dem von ihm konstruierten Horizontalpendel. Er stellte fest, dass die feste Erde bis zu einem gewissen Grade der Flutkraft

des Mondes nachgibt, also dass sie elastischen Gezeiten unterworfen ist. Spätere Messungen anderer Forscher haben diese Ergebnisse bestätigt. Aus diesen Ergebnissen hat man den Koeffizienten der Formelelastizität der Erde abgeleitet und zwar fand Schweydar ihn zu $6{,}1 \times 10^{11}$ (c g s), während die Chandlersche Periode der Polbewegung nach G. Herglotz den Wert $11{,}7 \times 10^{11}$ ergibt. Den Ursprung dieser Unstimmigkeit hat dann W. Schweydar näher untersucht und daran anknüpfend eine Untersuchung über die Magmaschicht vorgenommen. Das Gesamtresultat dieser Schweydarschen Arbeiten sei hier in folgendem kurz zusammengefasst.

Zunächst wurde die theoretische Grundlage der Bewegung eines Horizontalpendels unter dem Einfluss der fluterzeugenden Kraft des Mondes erörtert. Es wird gefolgert, dass das Horizontalpendel dem Monde vorauseilen muss, wenn die Deformation durch innere Reibung eine Verspätung gegen den Mond erleidet, die Phase der beobachteten Mondwelle also kleiner sein muss als die Phase des Flutpotentials. Die Berechnungen zeigen, dass die Horizontalpendelbeobachtungen bei Berücksichtigung der dynamischen Gezeiten des Meeres für die Starrheit der Erde einen Wert geben, der 2 bis 3 mal so gross ist als derjenige des Stahls und dieselbe Ordnung hat wie die aus der Polbewegung folgende Starrheit. Ebenso wird gezeigt, dass die aus den bisherigen Pendelbeobachtungen abgeleitete halbtägige Mondwelle nur eine sehr rohe Schätzung der Elastizität der Erde gestattet, welche für die Erdbebentheorie kaum Wert haben kann. Die Gezeiten verkleinern die Deformationen und vergrössern das Verhältnis der Ablenkung eines Horizontalpendels zu ihrem Werte bei völliger Starrheit der Erde. Ohne Berücksichtigung von Flut und Ebbe ergibt sich ein Starrheitskoeffizient der Erde zu $19{,}8 \cdot 10^{11}$, der nahezu übereinstimmt mit dem Wert aus der Polbewegung und der halbtägigen Mondwelle, wenn man bei dieser die dynamischen Gezeiten berücksichtigt. Unter Rücksicht auf die statische Polflut des Meeres erzielt sich aus der Chandlerschen Periode für die Starrheit der Erde der Wert $16{,}4 \cdot 10^{11}$ in naher Übereinstimmung mit den aus den Horizontalpendeln sich ergebenden Werten. Der Starrheitskoeffizient des 1500 km dicken Gesteinsmantels der Erde wird zu $7 \cdot 10^{11}$ und der des Kerns zu 20 bis $24 \cdot 10^{11}$ gefunden. Der Wert für den Mantel stimmt mit dem Ergebnis der Erdbebenbeobachtungen überein. Aus den neueren Untersuchungen der Geschwindigkeit der Transversalwellen in grösseren Tiefen der Erde, wie sie Geiger und Gutenberg angestellt haben, folgt für die Starrheit

der Erde in einer Tiefe von 0,4 Erdradius der Wert von et wa 36.10^{11}. Hieraus wird gefolgert, dass der Wiechertsche Metallkern im Innern der Erde nicht homogen sein kann. Die Erdbebenbeobachtungen aber können keinen näheren Aufschluss über die Konstitution des Erdinnern bringen, da sehr zähe Flüssigkeiten sich, nach Beobachtungen, bei raschen Deformationen wie feste Körper verhalten. Die Beobachtungen haben nämlich erwiesen, dass eine Magmaschicht, deren Fluidität auch nur mit derjenigen des Siegellacks bei Zimmertemperatur zu vergleichen und deren Mächtigkeit auch nur 100 km wäre, nicht vorhanden sein kann. Schätzungsweise ergibt sich, dass die Annahme einer etwa 600 km dicken zähflüssigen Schicht, deren Zähigkeitskoeffizient von der Ordnung 10^{13} bis 10^{14} ist, unter einer 120 km dicken Erdrinde mit den Beobachtungen am besten im Einklang steht. Mit Sicherheit aber kann geschlossen werden, dass unterhalb der Erdrinde sich eine leichtflüssige, z. B. mit geschmolzenen Metallen vergleichbare Schicht, **nicht** befindet. Das Magma muss man demnach als einen festen Körper betrachten.

Diese in vorstehendem nur skizzierten Ergebnisse der Schweydarschen Forschungen mögen nun noch einige ebenfalls kurz gehaltene Erläuterungen finden, soweit sie dem Rahmen der hier gegebenen Abhandlungen entsprechen.

Betrachten wir zunächst kurz die periodischen Deformationen der Niveaufläche und der Oberfläche der festen Erde durch die fluterzeugende Kraft des Mondes. Diese Kraft besitzt ein Potential, welches sich nach räumlichen Kugelfunktionen entwickeln lässt, und dessen Hauptglied der Entwicklung eine Kugelfunktion zweiten Grades ist. Ein Horizontalpendel verändert seine Gleichgewichtslage sowohl durch die Deformation der freien Oberfläche, wie der Niveaufläche der Erde. Letztere Störung bewegt das Pendel nach dem Monde hin, erstere in entgegengesetzter Richtung. Die Grösse der Bewegung des Pendels gibt demnach die Neigungsänderung der Erdscholle relativ zur deformierten Niveaufläche an. Es treten aber auch noch viele andere Schwierigkeiten hinzu. Die Verdichtung nach dem Erdzentrum hin verkleinert die elastischen Deformationen und zwar auf 0,806 gegenüber der homogenen Erde. Ferner kommen noch Schwierigkeiten hinzu, die in der Theorie der Elastizität eines Körpers von der Grösse der Erde liegen, deren Anfangsspannung infolge der Selbstgravitation grosse Werte besitzen muss. Wenn auch die Bedenken der letzten Art nicht allzusehr ins Gewicht fallen und das Wiechertsche Dichtegesetz über den Charakter einer Hypothese hinaus-

geht, so stellen sich doch der exakten Berechnung der Grösse der Deformation Schwierigkeiten entgegen, die in der Berücksichtigung des störenden Einflusses der ozeanischen Gezeiten liegen. Die Beobachtungen haben uns gezeigt, dass die Phase der Pendelbewegung nicht mit der theoretischen Phase des Potentials übereinstimmt, in einigen Fällen bleibt das Pendel gegen den Mond zurück, in anderen Fällen läuft es dem Monde vor. Hat die Deformation innere Reibung zu überwinden, so wird sie eine Verspätung gegen den Mond erleiden, das Pendel läuft dann dem Monde voraus.

Ausgedehnte Beobachtungen von Pendelbewegungen und daran anschliessend vielfache, meist recht komplizierte Berechnungen haben uns die Tatsache erschlossen, dass ausser dem direkten deformierenden Einfluss des Mondes ein sekundärer Einfluss vorhanden sein muss, der sich über die Deformationswelle mit einer Phasendifferenz lagert. Dieser störende Einfluss wird wohl nichts anderes sein, als die Biegung der Erdscholle durch die Gezeiten des Meeres. Die Phasen der Mondwelle erfordern somit noch ein sorgfältiges Studium.

In der Geologie und Geophysik findet man vielfach die Ansicht vertreten, dass die Erde unter einer verhältnismäfsig festen Erdrinde eine mehr oder minder flüssige Schicht von unbekannter Mächtigkeit birgt, die ihrerseits einen festen Kern umschliesst. Diese Schicht kann einen wesentlichen Anteil an der Zusammensetzung unserer Erde aber nicht haben.

Die Beobachtungen der Gezeiten des Meeres und der festen Oberfläche der Erde, ferner der Periode der Polschwankungen und der Präzession haben uns das Resultat erbracht, dass die Erde als Ganzes betrachtet sich gegen äussere Kräfte wie ein fester Körper verhält. Ohne Zweifel wird die etwa vorhandene Magmaschicht eine zähflüssige Masse sein, deren innerer Reibungskoeffizient eine sehr grosse Zahl ist. Dieser Koeffizient, auch Reibung, Zähigkeit, Viskosität genannt, kennzeichnet den Grad der Flüssigkeit; je grösser sein Wert, um so weniger flüssig ist die Masse. Zähe Flüssigkeiten mit sehr grossen Koeffizienten verhalten sich aber bei raschen Erschütterungen wie feste Körper, so dass also die Erdbebenbeobachtungen uns keinen näheren Aufschluss über die Magmaschicht geben können. Bei dem Problem der Gezeiten handelt es sich aber um Deformationen, deren Perioden in den hauptsächlichen Gliedern 12 und 24 Stunden betragen, so dass die Horizontalpendelbeobachtungen uns vielleicht ermöglichen könnten, einen Schluss auf die

Mächtigkeit einer Magmaschicht und die Grenzen, innerhalb derer die Fluidität zu suchen ist, zu ziehen.

Um nun in gewissem Sinne auf exakte Weise zu prüfen, ob eine, bisher nur auf Vermutungen beruhende Magmaschicht vorhanden ist, stellt Schweydar Untersuchungen über die Fluidität derselben an und berechnet den Einfluss, welchen die hypothetische Magmaschicht infolge des Wirkens der Flutkraft des Mondes auf die Bewegung eines Horizontalpendels ausübt. Die Magmaschicht ist als eine zähflüssige Masse definiert, die unterhalb der Erdrinde sich befindet. Die Mächtigkeit dieser Schicht kann aber nicht sehr gross sein; die Erdbebenbeobachtungen zeigen weiter, dass auch ihre Fluidität sehr gering oder der Koeffizient ihrer Zähigkeit sehr gross sein muss. Durch die Untersuchungen von G. Tammann über die Zustandsänderungen der Stoffe bei hohen Drucken ist festgestellt worden, das der feste Aggregatzustand weit über die sogenannte kritische Temperatur sich erhält, wenn der Druck nur bedeutend gesteigert wird. Die hohe Temperatur, welche ohne jeden Zweifel in grossen Tiefen unter der Erdoberfläche herrscht, beweist demnach nicht, dass die Magmaschicht flüssig sein müsse.

Um den Grad der Flüssigkeit und die Mächtigkeit nach den Horizontalpendeln zu berechnen, hat Schweydar der Vereinfachung wegen die Meeresgezeiten nicht berücksichtigt und die Erde als homogen betrachtet. Der Genauigkeit der Schätzung kommt dabei zustatten, dass die Inhomogenität die Deformationen der Erdoberfläche verkleinert (um etwa 0,2), während der Einfluss der dynamischen Meeresgezeiten sie um nahe ebensoviel vergrössert. Als plausibelster Wert für die Dicke der Erdrinde wird die Tiefe der Helmertschen Ausgleichsfläche = 120 km angesetzt und für die Dicke der Magmaschicht werden nacheinander in den Rechnungen 1200 km, 600 km und 120 km eingesetzt.

Nach den neuesten Untersuchungen von Benndorf beträgt die Geschwindigkeit der Transversalwellen bei Erdbeben in der Nähe der Erdoberfläche etwa 3,4 km in der Sekunde. Hieraus folgt für die Konstante der Formelastizität, den Starrheitskoeffizienten, der Wert $3{,}8 \cdot 10^{11}$ (cgs). Diese Zahl wird demnach sehr zutreffend den Starrheitskoeffizienten der 120 km dicken Erdrinde darstellen. Fehler in der Annahme über die Dicke und Elastizität der Erdrinde fallen nicht sehr ins Gewicht, da eine im Vergleich zum Erdradius sehr dünne elastische Schicht auf die Deformationen der Oberfläche sehr geringen Einfluss hat. In den

folgenden Rechnungsergebnissen, die hier ausnahmsweise etwas ausführlicher wiedergegeben werden, bedeutet somit $n_1 = 3{,}8 \,.\, 10^{11}$ den Starrheitskoeffizienten der 120 km dicken Erdrinde. Der Starrheitskoeffizient des Kerns n wurde eingesetzt $n = 4\, n_1$ und $n = 5\, n_1$. Spätere Berechnungen haben zwar gezeigt, dass n den 5- bis 6 fachen Betrag von n_1 ausmacht, aber die folgenden Rechnungsergebnisse ändern sich nicht wesentlich, wenn man für $\frac{n_1}{n}$ etwas kleinere Werte annimmt. Die Zähigkeit der Magmaschicht $= \varkappa$.

Die Höhe der Deformation der Erdoberfläche = k und ihre Verspätung gegen den Mond = v. Hieraus folgt die Amplitude der Pendelbewegung = H und ihre Verfrühung gegen den Mond $= \varkappa - A$. Die Grössen $(\varkappa' - A)$ und $\frac{H}{b}$ geben ein Mafs für die Fluidität des Magmas und seine Mächtigkeit, wobei H die Amplitude der Pendelbewegung des Horizontalpendels, b die Amplitude bei völliger Starre ist. Wir erhalten dann folgende Schweydarsche Tabellen:

Tabelle I. Dicke der Magmaschicht = 1200 km, $\frac{n_1}{n} = \frac{1}{4}$.

$\varkappa$	10^{16}	$5 \,.\, 10^{15}$	$2 \,.\, 10^{15}$	10^{15}	10^{14}	10^{13}
v	11°,1	10°,3	16°,0	24°,4	19°,2	9°,0
k	0,558	0,571	0,607	0,705	1,541	2,365
H/b	0,782	0,776	0,770	0,752	0,465	0,162
H	0″,00709	0″,00704	0″,00698	0″,00682	0″,00422	0″,00147
$\varkappa'$—A . . .	—3°,1	—3°,0	—5°,0	—8°,9	—25°,9	—66°,0

Tabelle II. Dicke der Magmaschicht = 600 km, $\frac{n_1}{n} = \frac{1}{4}$.

$\varkappa$	10^{17}	10^{16}	$5 \,.\, 10^{15}$	$2 \,.\, 10^{15}$	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}
v . .	26°,9	4°,1	2°,9	4°,5	10°,5	17°,0	26°,0	9°,3
k . .	0,477	0,548	0,551	0,554	0,554	0,816	1,236	2,402
H/b .	0,835	0,781	0,780	0,779	0,753	0,694	0,597	0,165
H . .	0″,00757	0″,00708	0″,00707	0″,00707	0″,00683	0″,00629	0″,00541	0″,00150
$\varkappa'$—A	—6°,0	—1°,1	—0°,8	—1°,3	—3°,0	—7°,9	—21°,3	—71°,5

Tabelle III. Dicke der Magmaschicht = 120 km, $\frac{n_1}{n} = \frac{1}{5}$.

$\varkappa$	2,6 . 10^{16}	1,3 . 10^{16}	0,7 . 10^{16}	0,3 . 10^{16}	1,4 . 10^{15}
v	1°,3	0°,6	0°,4	0°,3	0°,3
k	0,443	0,444	0,444	0,444	0,444
H/b . . .	0,822	0,822	0,822	0,822	0,822
H	0″,00746	0″,00746	0″,00746	0″,00746	0″,00746
$\varkappa'$—A . .	—0°,3	—0°,1	—0°,1	—0°,1	—0°,1
$\varkappa$	1,4 . 10^{14}	1,4 . 10^{13}	1,4 . 10^{12}	1,4 . 10^{11}	1,4 . 10^{10}
v	1°,8	4°,3	6°,1	36°,7	16°,1
k	0,446	0,504	0,521	0,810	2,321
H/b . . .	0,822	0,799	0,793	0,765	0,279
H	0″,00746	0″,00725	0″,00719	0″,00694	0″,00253
$\varkappa'$—A . .	—0°,4	—1°,1	—1°,6	—14°,7	—67°,2

Die Grösse k gibt die Höhe der Deformation in Einheiten von $\frac{W_2}{g} = 54$ cm an und nimmt im allgemeinen, wie die Tabellen zeigen, mit fortschreitender Verflüssigung der Schicht zu. Für die homogene vollkommen flüssige Erde ist $k = \frac{5}{2}$. Wir sehen, dass bei einer 1200 km dicken Magmaschicht schon bei dem Koeffizienten $\varkappa = 10^{13}$ die Oberflächendeformation nahezu ebenso gross wäre, wie bei einer vollkommen flüssigen Erde. Dieses Maximum würde bei 600 km Dicke für $\varkappa = 10^{12}$ und bei 120 km Dicke für $\varkappa = 10^{10}$ nahezu erreicht werden. Da der Zähigkeitskoeffizient des Siegellacks bei Zimmertemperatur von der Ordnung 10^9 ist, so können wir schliessen, dass eine Magmaschicht, deren Fluidität auch nur mit der des Siegellacks bei Zimmertemperatur zu vergleichen und deren Mächtigkeit auch nur 100 km wäre, **nicht** vorhanden sein kann.

Die Tabellen zeigen ferner, dass die Phase v, die Verspätung der Deformation der Erdoberfläche gegen den Mond, mit zunehmender Verflüssigung zunächst abnimmt, dann anwächst, um sich schliesslich rasch der Null zu nähern. Trotz der Unsicherheit der Phasen wegen des in I vermuteten sekundären Einflusses lehrt uns der Vergleich mit Tabelle I,

wenn wir auf H und auf $\varkappa'$—A gleichzeitig achten, dass eine 1200 km dicke zähflüssige Schicht wohl kaum vorhanden ist. Auch der Vergleich der Beobachtungsergebnisse mit der Tabelle III, die für die Mächtigkeit der Schicht 120 km annimmt, fällt nicht günstig für die Hypothese des Magmas aus. Dagegen stimmen in der Tabelle II für $\varkappa = 10^{13}$ bis 10^{14} die Grössen H und $\varkappa'$—A mit der Beobachtung gut überein und wir können schätzungsweise sagen, dass die Annahme einer ungefähr 600 km dicken zähflüssigen Schicht, deren Zähigkeitskoeffizient von der Ordnung 10^{13} bis 10^{14} ist, unterhalb einer ca. 120 km dicken Erdrinde mit den Beobachtungen im Einklang steht. Der effektive Zähigkeitskoeffizient ist bei der hier in Frage kommenden störenden Kraft, deren Periode 12 Stunden beträgt, von der Ordnung 10^9 bis 10^{10}. Die Zähigkeit ist demnach so gross, dass wir diese Schicht wie einen festen, harten Körper betrachten müssen.

Mit Sicherheit aber können wir aus allen Betrachtungen schliessen, dass unterhalb der Erdrinde sich eine leichtflüssige, z. B. mit geschmolzenen Metallen vergleichbare Schicht von auch nur geringer Mächtigkeit **nicht** befindet.

Um eine Vorstellung von der Zähigkeit, deren Ordnung 10^{13} bis 10^{14} ist, zu geben, führt Schweydar die Bestimmungen dieser Konstante für einige Stoffe an. R. Reiger (Über innere Reibung plastischer und fester Körper. Erlangen Diss. 1901) fand für reines Kolophonium bei 20^0 C $\varkappa = 6.10^{15}$, und bei 46^0 C $\varkappa = 3.10^{12}$. Die Untersuchungen von H. Glaser (Ann. d. Physik 22, 1907) ergaben für Gemische aus Kolophonium und Terpentinöl

von 80 % Kolophoniumgehalt $\varkappa = 9{,}2.10^{16}$,
» 90 % » $\varkappa = 4{,}7.10^{11}$.

Ferner ergab sich
für Gelatine . . $\varkappa = 10^6$ bis 10^8 nach Reiger,
» Siegellack . $\varkappa = 10^9$,
» festes Menthol $\varkappa = 10^{10}$ nach Heydweiler (Wied. Ann. 1897),
» Stahl . . . $\varkappa = 10^{16}$ bis 10^{18} nach Barus (Phil. Mag. 1850).

Wenn die Beobachtungen der Erdbebenwellen, die durch die grosse Zähigkeit nicht beeinflusst werden, uns genaueren Aufschluss über die Starrheit der Erdrinde und des Kernes geben, so wird es mit Hilfe der Registrierung des Mondeinflusses durch das Horizontalpendel möglich sein, die Konstante der Zähigkeit der Magmaschicht genauer zu bestimmen.

Vielfach ist in der wissenschaftlichen Welt die Meinung ausgesprochen worden, dass die kontinentalen Unregelmäſsigkeiten und Dichteanomalien in der Gestaltung der Erdrinde den Betrag der Deformation durch den Mond so beeinflussen würden, dass man die Unterschiede, die sich bei der mit dem Horizontalpendel beobachteten Mondwelle ergeben haben, erklären könnte. Obgleich es sehr unwahrscheinlich ist, dass eine Schicht, die nur 0,02 des Erdradius dick ist, einen merklichen Einfluss auf die Deformation der Erdrinde haben kann, so hat doch Schweydar eine genauere Schätzung dieses Einflusses rechnungsmäſsig bewirkt. Er kommt zu folgendem Ergebnis. Wird eine homogene Kugel, die denselben Radius, dieselbe Dichte und dieselbe Elastizität besitzt wie die Erde, mit einer dünnen elastischen Schicht belegt, deren Dichte die Hälfte, deren Starrheit $^1/_5$ von der der Erde ist und deren Mächtigkeit 0,02 des Erdradius beträgt, so werden die Deformationen der Hauptkugel durch die Schicht nahezu verschwindend beeinflusst. Man kann daraus also schliessen, dass die Deformationen der Erde durch eine 120 km dicke kontinentale Schicht verschwindend wenig geändert werden. Von noch geringerm Einfluss müssen also die Anomalien der Gestaltung, Dichte und Elastizität innerhalb dieser Schicht sein.

Dass die Horizontalpendel innerhalb der erreichbaren Genauigkeit auf die Nachgiebigkeit der Erde hinwiesen, haben wir nicht nur dem Betrag der Elastizitätkonstante, sondern auch der Grösse der Erde zu danken. Bestände die Erde nur aus einer 120 km dicken Kugelschale von der Elastizität des Stahls, so würden die Horizontalpendelbewegungen einen Schluss auf den Grad der Nachgiebigkeit der Schale nicht zulassen, da die Deformationen viel zu klein wären.

So wie die Erdkugel nun aber einmal ist, und unter Berücksichtigung der dynamischen Gezeiten für ein spezielles Tiefengesetz des Meeres, folgt aus den Horizontalpendelbeobachtungen, dass die Starrheit der Erde als Ganzes 2—3 mal so gross ist als die des Stahles und von derselben Ordnung als die Chandlersche Periode der Polbewegung sie fordert.

Man muss dabei jedoch nicht ausser acht lassen, dass dieses Resultat auf Grund von Berechnungen erhalten wurde, bei denen das Gezeitenphänomen durch Annahme eines speziellen Tiefengesetzes auf eine besonders vereinfachte Form gebracht wurde. Dagegen sind in Wirklichkeit die Gezeiten sehr kompliziert und völlig streng mathematisch sehr

schwer darzustellen. Beachten wir dieses und zudem die sicher vorhandene grosse Bedeutung der Meeresgezeiten für die Beurteilung der elastischen Gezeiten, so erkennt man, wie ausserordentlich schwierig die Starrheit der Erde aus der Bewegung des Horizontalpendels abzuleiten ist. Immerhin haben uns die überaus vielfach aufgezeichneten Registrierungen der Horizontalpendel, nahezu übereinstimmend mit der Polbewegung, für die Starrheit der Erde den Wert $19{,}8 . 10^{11}$ gegeben, der fast dreimal so gross ist als derjenige des Stahls. Man fand den Starrheitskoeffizient $n = 19{,}8 \times 10^{11}$ (c. g. s). Bei Berücksichtigung der Chandlerschen Periode der Polbewegung in Hinsicht auf die Polflut des Meeres ergaben Untersuchungen über die Elastizität des Kerns und des Gesteinsmantels der Erde $n = 16{,}4 . 10^{11}$. Die aus der Chandlerschen Periode sich ergebende Starrheit der Erde ist nahezu übereinstimmend mit den Resultaten aus den Registierungen der Horizontalpendel. Auch auf diesem Wege findet man die Starrheit der Erde als mehr wie zweimal so gross als diejenige des Stahls. Aus allen ziemlich ausführlichen Berechnungen, welche im geodätischen Institut zu Potsdam vorgenommen sind, ergibt sich im Mittel, dass der Starrheitskoeffizient

des Mantels $n_1 = 6{,}8 \times 10^{11}$

und diejenige

des Kerns $n = 19{,}7 \times 10^{11}$

ist. Es ist deshalb die Starrheit des Mantels der Erde mit der des Stahles zu vergleichen, wohingegen der Kern unserer Erde eine nahezu dreifache Starrheit als Stahl besitzen muss. Man muss aus diesen Beobachtungen an Horizontalpendeln und den Beobachtungen an Erdbebenwellen schliessen, dass der von Wiechert angenommene Erdkern nicht homogen sein kann.

In jüngster Zeit hat die rastlos vorwärtsstrebende Erdbebenforschung unsere Anschauungen von der Beschaffenheit des Erdinnern um einen ganz beträchtlichen Schritt vorwärts gebracht, und zwar auf Grund von Beobachtungen, welche an den über unseren ganzen Planeten verbreiteteten Erdbebenstationen mittels der Seismographen gemacht worden sind.

Mit Hilfe dieser verfeinerten Instrumente ist man in der Lage, den Gang der Erdbebenwellen genau zu verfolgen und man weiss heutzutage, dass bei einem Erdbeben zwei wesentlich verschiedene Arten von Bewegungen auftreten. Die wellenförmigen Erschütterungen, welche

sich infolge der Elastizität des Erdkörpers von dem Zentrum des Erdbebens aus fortpflanzen, bleiben zum Teil an der Oberfläche, nämlich die Wellen der sogenannten Hauptstörung, auf welche die katastrophalen Erscheinungen bei Erdbeben zurückzuführen sind. Ein anderer Teil der Bebenwellen dagegen, die Wellen der Vorstörungen geheissen, tauchen in beliebige Tiefen hinab, sie durchlaufen unter gewissen Umständen sogar den Mittelpunkt der Erde, um dann an die Erdoberfläche zurückzukehren. Man unterscheidet also «die Vorläufer und die Hauptwellen». Wie entstehen nun solche Erdbebenwellen?

Bei dieser Gelegenheit wäre zunächst ein kurzer Blick auf die Hypothesen über den Ursprung und die Entstehung der vulkanischen Tätigkeit zu werfen. Man hat beobachtet, dass viele Vulkane auf Bruchlinien unserer Erdkruste, sogenannten Verwerfungsspalten, liegen, welche die Erde allenthalben durchziehen. Hierauf stützt sich die Annahme, dass diese Bruchlinien bis in das flüssige Erdinnere hinabreichen und dass die in die Spalten eingedrungenen Wasser die Explosionen herbeiführen, was dadurch wieder wahrscheinlich gemacht wird, dass die jetzt tätigen Vulkane vielfach am Meere liegen. Diese Theorie ist jedoch nicht anzuerkennen, da weder die Spalten und Brüche, noch viel weniger das Wasser in solche Tiefen eindringen kann. Ausserdem widerspricht dieser Anschauung auch noch die Beobachtung, dass keineswegs alle Vulkane an Spalten gebunden sind, sondern dass es eine sehr grosse Menge von Vulkanen gibt, bei welchen ein Zusammenhang mit Spalten nicht nachzuweisen ist.

Auch die Theorie, dass bei Verschiebungen in der Erdrinde Wärme erzeugt werde, welche die Gesteine zu Magma umzuschmelzen imstande ist, oder diejenige, dass durch die Spalten Druckverhältnisse ausgelöst werden, welche Gesteinsumschmelzungen mit sich bringen, hat wenig für sich und steht mit der Tatsache in Widerspruch, dass Vulkane auch unabhängig von Spalten auftreten.

Man hat neuerdings — A. Stübel vertritt diese Ansicht — die vulkanische Tätigkeit aus der zentralen glutflüssigen Magmamasse in peripherische Herde verlegt, welche gleichsam als Relikte in der Erstarrungskruste übrig geblieben sein sollen. Die Ursache der Explosionen wird dann teils in der Berührung mit Wasser, teils in der Ausdehnung dieser Herde in gewissen Stadien der Erstarrung gesucht. Aus den Vulkanen tritt das Magma nicht aus dem Erdkern herauf, sondern nach der Theorie von Stübel aus isolierten Herden, die in der dicken

Erstarrungskruste der Erde sitzen, Herden, die Magmen von verschiedener chemischer Beschaffenheit und in verschiedenen Mengen enthalten. Wenn das Magma imstande ist, die feste Erdkruste zu durchbrechen, so dankt es das nicht seiner eigenen Kraft allein, denn die Vulkane finden sich auf der Erde fast nur in solchen Regionen, wo die Kruste von Brüchen durchsetzt und auf diese Weise aufgelockert ist. Infolge davon meiden die Vulkane meistens das Innere der Festländer und häufen sich an den Küsten. Hier, wo vielfach grosse Absenkungen stattgefunden haben, die enormen Tiefen des Ozeans bei Japan sind ein Beispiel dafür, findet das Magma, zum Teil wohl emporgepresst durch die sinkenden Massen, den Weg an die Oberfläche und es erfolgen Ausbrüche, bei denen die im Magma enthaltenen Wasserdämpfe und Gase die explodierende Wirkung ausüben.

Immerhin müssen wir eine bestimmte Abhängigkeit der Erdbebenwellen und dementsprechend auch der Erdbebenwirkung von dem geognostischen Untergrunde annehmen. Die Fähigkeit des Bodens, die lokalen Erschütterungen weiter fortzupflanzen, beruht sowohl auf der petrographischen Beschaffenheit desselben, wie auch auf seinem geologischen Bau. Es ist offenbar, dass in der Intensität und in der Ausbreitung der Erschütterungen auffällige Unterschiede hervortreten, je nachdem der Unterschied aus lockeren oder festen, massigen oder geschichteten, zerklüfteten oder stetig ausgedehnten Gesteinsmassen besteht, je nachdem er einförmig von ein und demselben Gesteine oder von verschiedenartigen, wechselnden Felsarten gebildet wird. In Gebieten von zusammenhängenden, festen und gleichartigen Gesteinsmassen werden sich die Erschütterungen des Bodens gleichförmig und weithin fortpflanzen, während sie sich da, wo der Boden oberflächlich aus losem Sande und Gerölle oder aus zerklüfteten Gesteinen besteht, in ungleichmäfsiger, verworrener und des losen Zusammenhanges und der grösseren Beweglichkeit aller Teile wegen in furchtbarer Weise kundgeben. Besonders zeigt sich dies an solchen Stellen, wo dünne Decken von lockeren Gesteinen auf einem festen Felsgrunde auflagern. Selbst bei geringen Erzitterungen des letzteren geraten die losen Massen oberhalb des Felsgrundes in eine förmlich springende Bewegung, deren Lebhaftigkeit mit der Lockerheit des Zusammenhanges wächst. Die Wirkung der Erdbeben ist deshalb dort am zerstörendsten, wo lose Schuttgesteine auf soliden, massigen Fels lagern, da aber, wo letzterer zutage tritt, ungleich geringer; hier hat man sogenannte Erdbebeninseln. Dagegen werden

feste Gebirgsglieder die Schwingungen und Erzitterungen, durch welche sie in Bewegung gesetzt werden, ungleich weiter fortpflanzen; also lose Sand- oder Schuttmassen. Doch auch die Ausdehnung und somit die Konturen des Erschütterungsareals der Erdbeben sind vom geologischen Bau des Untergrundes abhängig. So müssen vorzugsweise Spalten und Risse in der Gesteinsmasse die Fortpflanzung der Bodenerschütterung schwächen oder gar vollständig hemmen. Dagegen werden sich Erdstösse in massigen Gesteinen am regelmäfsigsten nach allen Seiten, in geschichteten Komplexen am weitesten in der Richtung der Schichtung fortpflanzen.

Wie bereits erwähnt, unterscheiden wir nun zwei Arten von Erdbebenwellen, die Vorläufer und die Hauptwellen. Diese ersteren, die Wellen der Vorläufer, besitzen eine erheblich grössere Geschwindigkeit als die Erdbebenwellen der Hauptstörungen. Nun kann man aus der Art und der Geschwindigkeit, mit denen sich elastische Wellen durch ein Medium hindurch fortpflanzen, Schlüsse auf die elastischen Eigenschaften dieses Mediums selbst ziehen. Nun rufen zwar die Hauptwellen der Erdbeben an den seismographischen Messinstrumenten die grössten Pendelausschläge hervor, aber sie sind für unsere Beobachtungen über den Zustand des Erdinnern hier nicht verwendbar, da sie sich vorwiegend an der Erdoberfläche entlang fortpflanzen, etwa wie die Wellen eines Teiches, in welchen man einen Kieselstein geworfen hat.

Anders aber ist es mit den Wellen der Vorläufer; hier haben wir es mit Bebenwellen zu tun, die durch das Erdinnere gelaufen sind. Es sind zwei Arten von Vorläuferwellen bekannt; solche, bei denen jedes Bodenteilchen den Stoss auf das vor ihm liegende, also in der Fortpflanzungsrichtung überträgt, und solche, bei denen jedes Teilchen das nächste seitwärts aus der Ruhelage zieht, wie dies beim Spielen einer Violinseite der Fall ist.

Da im allgemeinen nun die Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Vorläuferbebenwellen gewinnt, je tiefer sie in das Innere der Erde hinabdringen, so geben uns die Vorläufer ein sehr gutes Beobachtungsmaterial her. Man hat gefunden, dass die Geschwindigkeitssteigerung der Vorläufer im äussersten Fünftel des Erdballes ungemein rasch erfolgt, während sie sich weiter, dem Erdmittelpunkte zu, wieder verlangsamt. Aus seinen Beobachtungen konnte E. Wiechert deshalb schliessen, dass in rund 1500 km Tiefe die Beschaffenheit und ins-

besondere die Dichteverhältnisse der dort lagernden Massen unserer Erdkugel sich ziemlich plötzlich ändern müssen.

«In den Steinmantel der Erde, den wir uns, nach H. Lenk (Über die Natur des Erdinnern; Erlangen 1909) als eine heterogene, kristallinisch differenzierte, im wesentlichen dem Granit gleichende Masse vorstellen müssen, wächst mit dem Druck auch die Dichte, und man begreift unschwer, dass damit auch die Geschwindigkeit der Bebenwellen sich entsprechend steigern muss. In dem glutigen Metallkern im Inneren herrscht dagegen, wohl der durch die Hitze bedingten Dissoziation der Materie wegen, (wahrscheinlich oder vielleicht) Homogenität, und die Dichte wird ebensowenig wie die Temperatur sonderliche Verschiedenheiten zeigen; auch die Erdbebenwellen erfahren darum hier keine wesentliche Beschleunigung mehr.»

Sobald man in den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts erkannte, dass mit feinen Instrumenten bei stärkeren Erdbeben die Erdbebenwellen auf der ganzen Erde bemerkt werden können, erwachte die Hoffnung, durch ihre Beobachtung zu Schlüssen über die Beschaffenheit des Erdinnern zu gelangen. Auf Grund eines Aufrufs, den v. Rebeur-Paschwitz verfasste, erfolgte die Errichtung eines internationalen Systems von Erdbebenstationen, es entstand die «Internationale seismologische Assoziation» der Staaten, welche den grössten Teil der Kulturnationen umfasst und so die Erde umspannt. Da es fast sicher ist, dass die von einem Erdbebenherde ausstrahlende elastische Bewegung sich durch den Erdkörper fortpflanzt, mit einer Geschwindigkeit, deren Grösse von der Dichtigkeit und Elastizität der verschiedenen Tiefenschichten abhängen muss und da sichere Anzeichen vorhanden sind, dass diese Geschwindigkeit mit der Tiefe, welche die Bewegung erreichte, veränderlich ist, so geben die Erdbebenbeobachtungen ein Mittel in die Hand, um auf indirektem Wege Aufschlüsse über den Zustand des Erdinnern zu erhalten, welches wohl für alle Zeiten der direkten Beobachtung verschlossen sein wird. Schon in 1500 km Tiefe wird rund $^1/_2$ Million Atmosphären Druck erreicht und weiterhin wird eine, dann eine zweite Million sicher überschritten. Wir finden aber mit unseren bescheidenen technischen Mitteln schon Schwierigkeiten, auch nur 10000 Atmosphären zu erreichen. Wird also durch die Beobachtung der Erdbebenwellen das Innere der Erde uns erschlossen, so dürfen wir hoffen, zu einer erheblichen Erweiterung unseres Wissens zu gelangen.

Über den Aggregatzustand der Erde und die kritische Temperatur herrschen die verschiedenartigsten Ansichten. R. D. Oldham sagte zu diesem Problem in seiner Abhandlung The Constitution of the Earth as revealed by Earthquakes im Quarterly Journ. of the Geol. Soc., 1906, Bd. 62, S. 456, noch kürzlich: «Mannigfache Theorien der Erde sind im Laufe der Zeit vorgeschlagen worden, es wurde wechselsweise angenommen, die Substanz im Innern sei feurig, flüssig, fest und gasförmig, bis die Geologen sich voller Verzweiflung von der Frage ganz abwandten, um ihre Aufmerksamkeit nur noch der äusseren Rinde der Erde zuzuwenden und die Frage noch dem Zustand des Innern den Mathematikern als freien Tummelplatz zu überlassen».

Vor allem wurde, wie E. Wiechert dazu bemerkt, die Ansicht verhängnisvoll, die Erde müsse im Innern feurig-gasförmig sein, weil die Temperatur jedenfalls so hoch sei, dass für alle bekannten Substanzen, die «kritische» Temperaturgrenze überschritten sei, über welche sie nach den physikalischen Erfahrungen nur gasförmig existieren könnten. Diese Schlüsse sind indessen nicht ohne weiteres anzuerkennen. Die kritische Temperatur verkennt man völlig, wenn man annimmt, es handle sich um eine allumfassende einschneidende Grenze für den betreffenden Stoff. Die kritische Temperatur bezieht sich aber doch nur auf eine einzige besondere Art der Zustandsänderung des Stoffes. Wiechert fasst hierzu als Beispiel die Verdampfung des Wassers zu Wasserdampf ins Auge und bemerkt dann folgendes. Wird die Temperatur, bei welcher die Wasserverdampfung untersucht wird, mehr und mehr erhöht, so nimmt die Dichte des verdampfenden Wassers mehr und mehr ab, die Dichte des gesättigten Dampfes aber wächst höher und höher an. Schliesslich verschwindet bei der kritischen Temperatur die Dichtedifferenz überhaupt. Darüber hinaus fällt der Sprung der «Verdampfung» in der Zustandsänderung fort, indem sich nun dort, wo unterhalb der kritischen Temperatur bei Drucksteigerung eine unstetige Änderung einstellte, eine ständige Folge von Änderungen aneinander reiht. Damit ist die Bedeutung der kritischen Temperatur dargelegt, damit ist sie aber auch völlig erschöpft. Wir haben nicht den mindesten Anlass, zu vermuten, dass auch beliebig weit über der kritischen Temperatur die Zustandsänderungen bei steigendem Druck nicht zu immer grösserer Zähigkeit und schliesslich zu beliebig grosser «Riegheit» führen und es gibt auch keinen Grund, nach welchem sprunghafte Zustandsänderungen an anderen Stellen der Reihe ausgeschlossen sein sollten. Der hier erstmalig

angewandte Ausdruck «Riegheit» bedeutet dabei die «Elastische Widerstandsfähigkeit gegen Formveränderungen». G. Tamman, bei seinen Untersuchungen über die Zustandsänderungen der Substanzen unter hohen Drucken, hat folgendes gefunden. Die kritische Temperatur des flüssigen Phosphoniumchlorids liegt bei etwa 50° C, der kritische Druck beträgt dabei etwa 75 Atmosphären. Wird nun aber bei 50° der Druck weiter erhöht, so gelangt man bei 750 Atmosphären zu einem Erstarrungspunkt und zwar tritt hier Kristallisation ein. Wird die Temperatur noch weiter erhöht, also über die kritische Temperatur des flüssigen Phosphoniumchlorids hinaus, so lässt sich die Kristallisation, also der feste Aggregatzustand immer noch beobachten, nur steigt der erforderliche Druck. Bei 100° C ergibt sich der Kristallisationsdruck schon zu 3000 Atmosphären. Diese Resultate stellen somit sicher, dass weit über die kritische Temperatur hinaus der feste Aggregatzustand sehr wohl bestehen kann, wenn nur der Druck genügend erhöht wird. In allen solchen Beispielen zeigt uns das bequem zu handhabende Mittel der Temperaturveränderung, wie mit einer Auflockerung der Moleküle eine Verminderung, mit einer Verdichtung eine Vermehrung der Zähigkeit verbunden ist. Es ist ja nun bei der hohen Temperatur des Erdkörpers sehr wahrscheinlich, dass die Substanzen im tiefen Erdinnern, wenn wir sie vom Druck, ohne Änderung der Temperatur, entlasten könnten, in den gasförmigen Zustand übergehen würden. Darum aber kann man doch nicht die Substanzen im Innern unserer Erde als gasförmig bezeichnen. Sehr wichtig erscheint es, wie ein und derselbe Stoff schneller wechselnden Kräften gegenüber als sehr riege erscheinen kann, während er lange andauernden Kräften gegenüber durchaus das Verhalten einer Flüssigkeit annimmt, z. B. Pech und Glas, die kalt spröde sind, aber erwärmt plastisch, weich und schliesslich flüssig werden. Sehr wahrscheinlich bietet uns die Erde im ganzen oder wenigstens mit ihrer Rinde einen ähnlichen Fall, indem sie sich gegenüber den bei Erdbeben im Laufe von Sekunden oder Minuten, bei Ebbe und Flut im Laufe von Stunden oder Tagen, bei den Polschwankungen im Laufe von Monaten variierenden Kräften als sehr riege erweist nnd dennoch nachgiebig wie eine Flüssigkeit ist gegenüber den in Jahrtausenden oder Jahrmillionen variierenden Kräften infolge von geologischen Umgestaltungen oder von kosmischen Änderungen ihrer Rotationsgeschwindigkeit.

Über die elastische Widerstandsfähigkeit — Riegheit — also über das Verhalten der Erde im ganzen gegenüber deformierenden Kräften geben

uns die Erscheinungen der Ebbe und Flut und die Polschwankungen Aufschluss. Die halbtägige Ebbe und Flut ist so gross, wie es etwa im grossen und ganzen bei vollkommener Starrheit der Erde zu erwarten wäre. Weitere Schlüsse über der Verhalten der Erde zu ziehen ist bei der Kompliziertheit des Phänomens durch Schwingungen und Stauungen des Meeres nicht möglich gewesen. Günstiger liegen die Verhältnisse schon bei der halbmonatlichen Flut, die durch die Bewegung des Mondes in seiner Bahn verursucht wird und darum besonders von Lord Kelwin untersucht wurde. Bei der viel längeren Dauer wird nämlich dem Wasser Zeit gelassen, sich die neue Ruhelage gemäfs den veränderten Kräften zu suchen. Dabei zeigte sich, dass die Erde jedenfalls rieger ist als Glas, doch schien die Grösse der Ebbe und Flut nicht ganz die Grenze zu erreichen, welche der völligen Starrheit entsprechen würde, so dass eine gewisse Nachgiebigkeit etwa von der Grössenordnung der des Stahles wahrscheinlich wurde.

Die Polschwankungen fand man durch die Beobachtung, dass die geographische Breite innerhalb gewisser Grenzen veränderlich ist und es wurde festgestellt, dass sie eintreten, weil die Achse, um welche die Erde sich dreht, im Laufe der Zeit sich im Erdkörper ein wenig ändert. Die Abweichungen dieser Rotationsachse von der kleinen Erdachse steigen auf etwa 0,3 Bogensekunden, so dass also der Durchstossungspunkt der jeweiligen Drehungsachse an einem der Erdpole auf der Erdoberfläche sich von der Mittelachse bis zu rund etwa 10 m entfernt. Wäre die Erde vollkommen starr und wirkten keine störenden Kräfte, so müssten die Drehpole Kreise um die Mittelachse beschreiben und diese Kreise in 305 Tagen durchlaufen. Der wirkliche Verlauf der Polschwankungen ist aber nun wesentlich anders. Die Drehachse beschreibt keine Kreise, sondern unregelmäfsige Schleifen wechselnder Grösse und die Umlaufszeit beträgt nicht 305, sondern 427 Tage. Man kann aus diesen Erfahrungen schliessen, dass Störungen, welche eine Verlegung der Drehachse bewirken, fortwährend stattfinden und dass die Erde sich nicht wie ein starrer Körper verhält. Aus dem Unterschied der beiden Perioden kann man durch Rechnung einen Schluss auf die elastische Widerstandsfähigkeit — Riegheit — des Erdkörpers machen. Es folgt, dass die Erde im Mittel zweimal rieger als Stahl ist. Diese ausserordentlich grosse Widerstandsfähigkeit zeigt sich also noch gegenüber deformierenden Kräften, die ihre Periode erst in 427 Tagen, also in mehr als einem Jahre durchlaufen. Aus den Polschwankungen

ist zu schliessen, dass die Geschwindigkeit der transversalen Wellen in der Erde im Mittel etwa 6 km in 1 Sekunde beträgt. Die elastischen transversalen Wellen bilden bei Erdbeben die zweiten Vorläufer.

Haben nun schon die Überlegungen über die Bedeutung der kritischen Temperatur gelehrt, dass alle Folgerungen über einen flüssigen oder gar gasförmigen Aggregatzustand, welche an die jedenfalls vorhandene hohe Temperatur im Innern der Erde geknüpft wurden, durchaus unsicher sind, so lassen die Erklärungen der Ebbe und Flut und der Polschwankungen nicht den mindesten Zweifel darüber, dass solchen Vorstellungen entsagt werden muss. Die Erde im ganzen verhält sich wie ein fester Körper, dessen Riegheit selbst die des Stahles unter den uns gewohnten Temperaturverhältnissen noch weit übertrifft.

Die Gestalt der Erde, also vor allem ihre Abplattung, hängt von Massenverteilung im Innern ab. Wäre die Dichte überall gleich, so müsste die Erde um $^1/_{231}$ abgeplattet sein; tatsächlich aber erreicht die Abplattung nur etwa $^1/_{298}$. Daraus lässt sich folgern, dass die Dichte der Erdmasse nach der Tiefe zu wachsen muss. Dies zeigt sich auch, dass die mittlere Dichte der Erde, wie aus Messungen der Gravitationskonstante geschlossen wurde, sich zu 5,53 ergibt, während die Oberfläche der Erde aus Gestein gebildet wird, dessen Dichte etwa bei 2,5 oder nicht viel darüber liegt.

Bis zu einem gewissen Grade erlaubt also die Grösse der tatsächlichen Abplattung unserer Erde einen Schluss auf die Massenverteilung im Innern der Erde, doch bleibt hierbei noch eine weitgehende Unbestimmtheit, denn es lassen sich unendlich viele Dichte-Verteilungen angeben, welche zu dem wirklichen Werte der Abplattung führen würden. Man hat sich darum in älteren Zeiten darauf beschränkt gesehen, die Massenanordnung hypothetisch zu erschliessen. Besonders erwähnenswert sind dabei die Hypothesen von Legendre und von Roche. Ersteren (1789) folgte kurze Zeit später auch Laplace. Beide Hypothesen setzen eine stetige Änderung der Dichte voraus, so dass der Aufbau der Erde aus einem Stoff bestehe, der nach innen zu durch den wachsenden Druck immer stärker komprimiert ist. Legendre erhält in seinen Berechnungen für den Mittelpunkt der Erde einen Druck von 3,1 Millionen Atmosphären. Ferner ergibt sich die Volumenelastizität des Erdstoffes an der Oberfläche zu 400 000, im Mittelpunkt zu 6 500 000. Für die Oberfläche erhält Legendre eine Kompressibilität, die etwa den geologisch älteren Gesteinen entspricht; seine Hypothese scheint sich

hier also zu bewähren. Roche kommt bei seinen Untersuchungen zu einem Druck im Mittelpunkt der Erde von 3 Millionen Atmosphären und für die Volumenelastizität an der Oberfläche der Erde zu 200 000, im Mittelpunkt zu rund 800000. Will man nun in der Dichtevermehrung eine Wirkung des steigenden Druckes nach dem Innern der Erde hin sehen, so müsste bei der Legendreschen Hypothese eine Kompression auf $^1/_4$, bei der Rocheschen nahezu auf $^1/_5$ des Volumens von der Oberfläche der Erde bis zum Mittelpunkte angenommen werden. Bei der ausserordentlichen Widerstandsfähigkeit, die den Molekülen nach den physikalischen Erfahrungen zugeschrieben werden muss, erscheint aber eine solche Folgerung nicht erlaubt. Neuere Untersuchungen haben dann auch ergeben, dass der Radius des Metallkerns auf $^4/_5$ bis $^3/_4$ des Radius der Erdkugel zu schätzen ist und dass die Dichte des Metallkerns ein wenig über 8 liegt, das heisst, es folgt eine Dichte, die gerade dem etwas komprimierten Eisen = 7,8 entspricht. Die Hypothese Wiecherts einer zweiteiligen Erde passt sich also gut der Vorstellung an, dass der Metallkern der Erde in der Hauptsache aus Eisen besteht. Neuere Berechnungen Wiecherts über die Massenverteilung in der Erde zeigen für den denkbar einfachsten Fall der Rechnung, dass ein Steinmantel von nicht variabler Dichte einen Metallkern von nicht merklich variabler Dichte umhülle, sehr günstige Resultate. Setzt man die Abplattung der Erde = ε, die Dichte des Metallkerns = δ', die Dichte des Steinmantels δ = 3,0, 3,2 bis 3,4, ferner den Radius des Metallkerns = r' und den Radius der Erdkugel = $\bar{r}$, so erhält man unter der Annahme von 5,53 für die mittlere Dichtigkeit der Erde

	$\delta = 3{,}0$	$\delta = 3{,}2$	$\delta = 3{,}4$	$\delta = 3{,}0$	$\delta = 3{,}2$	$\delta = 3{,}4$
$\varepsilon =$	$r'/\bar{r}$			δ'		
$^1/_{298}$	0,792	0,773	0,749	8,05	8,22	8,45
$^1/_{297}$	0,795	0,776	0,753	8,00	8,16	8,38
$^1/_{296}$	0,798	0,780	0,757	7,94	8,10	8,30

Der Steinmantel muss eine Dichte erhalten, die nach unseren Erfahrungen auch innerhalb der Grenzen der Wahrscheinlichkeit liegt; als solche Grenzen gelten die Dichten δ = 3,0 bis 3,4. Der Wert $\varepsilon = {}^1/_{298}$ für Abplattung der Erde ist nach Helmert der beste, den man zur Zeit aus der Gesamtheit der Pendelbeobachtungen ableiten kann.

G. H. Darwin entschied sich früher für $^1/_{297}$. Das Rechnungsergebnis von etwas über 8 für die Dichte des Metallkerns spricht insofern sehr zu ihren Gunsten, als das Eisen sowohl bei dem Aufbau der Erde, wie auch bei dem der Sonne sehr stark beteiligt ist. Es fallen auf die Erde vorherrschend Meteore, die teils aus Stein, teils aus Eisen bestehen. Eisen ist also sicher einer der Hauptbestandteile unseres Sonnensystems.

Man bezeichnet nun in der Erdbebenkunde diejenigen Wellen, welche sich durch Stoss auf das vor ihnen liegende Bodenteilchen, also in der Fortpflanzungsrichtung, überträgt, als «longitudinale» Wellen, auch Verdichtungs- und Verdünnungswellen. Die andere Art der Erdbebenwellen, welche seitswärts hin sich verbreiten, heissen dementprechend «transversale» Wellen, sie sind in Gasen und Flüssigkeiten unmöglich, Da sie aber bei den Erdbeben beobachtet werden, so können wir daraus schliessen, dass sich das Erdinnere diesen schnellen transversalen Bewegungen gegenüber wie ein fester Körper verhält. Man hat ferner gefunden, dass die «Laufzeit», also jene Zeit, welche eine Erdbebenwelle braucht, um vom Herd zur Beobachtungsstation zu gelangen, bei den Transversalwellen fast doppelt so gross ist als bei den Longitudinalwellen.

Bei der mathematischen Konstruktion der Laufzeitkurve von Longitudinalwellen bemerken wir, dass diese Kurve sich bis 4500 km immer mehr krümmt und zwar nimmt die Geschwindigkeit der Wellen zu. Wir schliessen hieraus, dass die Dichtigkeit der durchmessenen Schichten immer mehr wächst, je tiefer die Wellen hinabtauchen. Die grösste Tiefe, bis zu welcher wir diesen Vorgang bemerken oder verfolgen können, beträgt unter den von E. Wiechert gemachten recht wahrscheinlichen Annahmen über die Beugung der Erdbebenwellen 1500 km. Die bis zu dieser Tiefe hinabgetauchten Wellen tauchen wieder in 4500 km Entfernung vom Erdbebenherd an die Erdoberfläche empor. Alle in grösserer Entfernung auftauchenden Wellen haben den inneren von Benndorf und Wiechert entdeckten Kern passiert, welcher konstante Dichte besitzt. Wiechert und Zoeppritz berechneten, dass ihren Beobachtungen zufolge die Wellengeschwindigkeit bis zu einer Tiefe von ungefähr 1500 km zunahm, dort aber konstant wurde; bei 3000 km endete zunächst das Beobachtungsmaterial. Neuerdings zeigte sich nun bei der Bearbeitung neuer Erdbebendiagramme, dass in Herdentfernungen von etwa 12 000 km bis 16 000 km, gemessen auf der Erdoberfläche, keine longitudinale Wellen auftreten, dass sie aber bei

16 000 km Entfernung plötzlich sehr heftig sind. Ihre Stärke nimmt indessen schnell wieder ab, wenn die Herdentfernung noch grösser ist. Alle Longitudinalwellen, die aus 16 000 km Distanz oder noch weiter her kommen, zeigen eine starke Verspätung gegenüber den Wellen aus geringeren Entfernungen. Die neueren Beobachtungen über die Laufzeit der longitudinalen Erdbebenwellen zwischen 6000—7000 km, ebenso zwischen 8000—9000 km stimmen gut mit der älteren Wiechert-Zoeppritzschen Laufzeitkurve überein. Anders aber ist es bei 5000—6000 km und ebenso zwischen 7000—8000 km, wo die neueren Beobachtungen ganz systematisch von der früheren Kurve abweichen. Die Geschwindigkeiten wechseln manchmal ganz plötzlich und stark, manchmal weniger. Es entsteht darum die Frage, wie man sich die abwechselnde Abnahme und Zunahme der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen erklären soll. Bezweifeln können wir diese Geschwindigkeitsänderungen kaum, da die Wendepunkte von einer grossen Zahl unabhängig voneinander arbeitender Beobachter bestimmt sind und ferner durch die auf ganz anderem Wege gefundenen Ergebnisse von Geiger und Gutenberg im wesentlichen bestätigt sind.

Dass in einer so grossen Entfernung vom Erdmittelpunkte, mehr als 3000 km von ihm entfernte, dichtere und daher schwerere Massen über weniger dichten, leichteren liegen sollen, kann man mit K. Wegener kaum annehmen. Weniger bedenklich wäre vielleicht die Vorstellung, dass wir es bei der Abnahme der Geschwindigkeit der Longitudinalwellen — und nur von diesen ist hier zunächst die Rede — mit Beugungserscheinungen zu tun haben, die sich an den Oberflächen verschiedener «Schalen» des Erdinnern ausbilden. Aber wie sollten derartige Schalen zustande kommen, ausser, wenn die jeweils innere auch dichter wäre? Und die Beobachtungen auch mit ganz anderen Methoden zeigen, wie Wiechert dies bereits fand, zweifellos eine merklich konstante Dichte bei konstantem Elastizitätskoeffizienten. Der Gedanke verschiedener unabhängiger Schalen gleicher Dichte aber von wechselndem Elastizitätskoeffizienten muss gleichfalls abgewiesen werden. Die Kurve der Longitudinalwellen schliesst bei 13 000 km ab, obgleich aus grösseren Herdentfernungen, z. B. 12 000 km, eine grosse Zahl von Beobachtungen vorhanden ist, lässt sich die Kurve der Longitudinalwellen nicht über diese Entfernung hinaus fortsetzen. Hier ist also eine Unstetigkeitsfläche, wie solche auch schon in anderen Entfernungen nachgewiesen werden konnten. Die Erklärung für diese neue Unstetigkeitsfläche ist nicht einfach.

Am meisten einleuchtend ist es vielleicht, anzunehmen, dass zwischen der Laufzeitkurve der Longitudinalwellen und den beobachteten Wellen von 12000 km kein Zusammenhang besteht, und dass die Erdoberfläche jenseits 10300 km gegen die Longitudinalwellen eines Bebens beschattet wird durch einen Erdkern, der undurchlässig ist gegen die Longitudinalwellen. Allerdings bleibt dann die Beobachtung von Wellen bei 12000 km zunächst unerklärt. Aus den aber gerade neuerdings in dieser Entfernung zahlreichen Beobachtungen scheint hervorzugehen, dass die longitudinalen Wellen, welche bei 10300 km wieder an die Erdoberfläche emportauchen, einen inneren Kern der Erde gestreift haben, gleichviel, ob man es für wahrscheinlicher hält, dass die Wellen in der Tiefe zerstört, oder dass sie verlangsamt werden.

Alle Unstetigkeiten der passierten Schichten des Erdinnern finden sich nun für die Transversalwellen ebenso ausgeprägt wie für die Longitudinalwellen; aber die gleiche Unstetigkeit, die bei longitudinalen eine Verzögerung hervorruft, bewirkt bei transversalen Wellen eine Beschleunigung. Ausnahme hiervon ist nur ein Sprung bei 4500 km. Bei der sonstigen Übereinstimmung longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen ist diese Beobachtung doppelt merkwürdig. Durch Änderungen der Dichte in der Tiefe kann es jedenfalls nicht erklärt werden, denn jede Dichteänderuug muss auf die Wellengeschwindigkeit, sowohl longitudinaler wie transversaler, in gleichem Sinne einwirken. Wie sollen wir uns aber Schichtgrenzen vorstellen, wenn nicht zugleich Dichtigkeitsänderung eintritt? Bei 11000 km verschwinden die Transversalwellen ganz analog den Longitudinalwellen vollständig; die diesen Entfernungen zustrebenden Erdbebenwellen müssen hier also wohl einen neuen, für sie nicht durchlässigen Kern der Erde angetroffen haben.

Man hat nun auf Grund des über Erdbebenwellen gesammelten Beobachtungsmaterials die Geschwindigkeit elastischer Wellen in verschiedenen Tiefen der Erde zu berechnen gesucht und gefunden, dass die Geschwindigkeit bestimmter Erdbebenwellen von der Erdoberfläche aus nach der Tiefe zu schnell wächst. Dieses schnelle Anwachsen der Geschwindigkeit hört aber in einer Tiefe von ungefähr 1500 km plötzlich auf und man hat ferner festgestellt, dass jenseits von 1500 km die Geschwindigkeitszunahme bestimmter Wellen nicht nur aufhört, sondern sogar in eine Geschwindigkeitsabnahme übergeht. Möglicherweise hängt diese Unstimmigkeit damit zusammen, dass die Geschwindigkeitszunahme im Erdmantel ganz unvermittelt in eine Geschwindigkeitsabnahme im

Kern übergeht, während tatsächlich vielleicht ein mehr allmählicher Übergang stattfindet. Besteht der Mantel, welcher durch Geschwindigkeitszunahme ausgezeichnet ist, aus Silikatgesteinen, der Kern mit Geschwindigkeitsabnahme aber im wesentlichen aus Eisen, so brauchen wir doch keine allzu scharfe Grenze zwischen Steinmantel und Metallkern zu erwarten. Kennt man doch bei Meteoriten alle Übergänge von sogenannten Steinmeteoriten bis zu reinen Eisenmeteoriten. Für die Geschwindigkeitsverteilung im Erdinnern ergibt sich noch eine weiter verstärkte Geschwindigkeitsabnahme in einer Tiefe von etwa 2470 km (Erdradius = 3900 km). Man wird sich etwa folgendes Bild vom Vorgang eines Bebens machen können: Gewisse deformierende Kräfte in den äussersten Erdschichten, die besonders in den von Erdbeben heimgesuchten Teilen unserer Erdoberfläche auftreten, wachsen an, bis die Festigkeit der Gesteine überschritten wird und ein Riss erfolgt. Die Gesteinsmassen zu beiden Seiten des Risses oder des Risssystems werden einer neuen Gleichgewichtslage zustreben. Die ursprünglich potentielle Energie wird sich dabei in kinetische Energie umwandeln. Allmählich wird durch Strahlung und Reibung die Energie dann unter mehrfachem Wechsel zwischen ihrer kinetischen und ihrer potentiellen Form aufgezehrt. Vielfach folgen bei den Erdbeben dem ersten Einsatz noch eine ganze Reihe fast ebenso starker Ausschläge des Seismographen, was man vielleicht mit einiger Wahrscheinlichkeit, das Richtige zu treffen, in folgender Weise deuten kann: Dem ersten auslösenden Ruck schliessen sich weitere, bald kräftigere, bald minder kräftige Zerreissungen an, die in ihrer Gesamtheit zu riesigen Massenbewegungen und entsprechend starken Hauptwellen Anlass geben. Es gewinnt so den Anschein, als entständen besonders kräftige Hauptwellen immer dann, wenn durch derartige mehrfache Auslösung allmählich besonders grosse Gesteinsmassen in Bewegung geraten. Eine weitere Unstetigkeitsfläche, innerhalb welcher die Geschwindigkeit von Erdbebenwellen, soweit uns bisher Beobachtungsmaterial darüber vorliegt, scheint zwischen 3000 bis 4600 km Herdentfernung zu bestehen. Ebenso weist die Zone von 9000 bis 14 000 km auf gewisse Unregelmäſsigkeiten der Geschwindigkeitsverteilung in tieferen Teilen des Erdkörpers hin, die aus der Laufzeitkurve der Erdbebenwellen sich wegen ihres zu geringen, nur nach wenigen Sekunden sich bemessenden Einflusses nicht mehr erschliessen lassen. Erst wenn das Netz der Beobachtungsstationen für Erdbeben noch weit ausgedehnter sein wird, dürfen wir eine einwandfreie Klarlegung der Natur aller in Frage

kommenden verschiedenen Erdbebenwellen, oder Wellengruppen erhoffen. Immerhin haben die fortgesetzten seismographischen Aufzeichnungen uns ständig neues Material geliefert. Während man noch vor wenig Jahren auf Grund der damals vorliegenden Beobachtungen im Erdinnern nur eine Unstetigkeitsfläche in 1519 km Tiefe angenommen hatte, liefert die neue Annahme deren drei in 1194, 1677 und 2436 km Tiefe. Die mittleren Fehler dieser drei Tiefen können vorläufig nur ganz roh auf ± 50, ± 100 und ± 150 km geschätzt werden. Um diese drei Unstetigkeitsflächen genauer bestimmen zu können, hat man die transversalen und ebenso die longitudinalen Erdbebenwellen eingehender studiert. Beide Beobachtungen haben die drei Unstetigkeitsflächen genügend sicher erwiesen. Als Konstanten dieser drei Flächen fand man:

Tiefe in km	Geschwindigkeit der Longitudinalen,	der transversalen Wellen in km/Sek.
0	7,174	4,010
1193 ± 50	11,80	6,59
1712 ± 100	12,22	6,86
2454 ± 100	13,29	7,32

Man kann somit aus den Erdbebenwellen Schlüsse auf den Einfluss der Schichtung der Erdoberfläche ziehen. Nach allen vorliegenden Beobachtungen ist die Herdtiefe stets nur sehr gering gegenüber den Abmessungen unserer ganzen Erde, denn die Hauptwirkungen eines Erdbebens an der Erdoberfläche sind stets nur auf ein eng umgrenztes Gebiet beschränkt. Es kann die Herdtiefe wohl schwerlich jemals 100 km erreichen, vielmehr wird sie sicherlich in der Regel vielleicht immer viel kleiner sein. Es liegt sogar die Vermutung nicht fern, dass der Herd stets, oder doch in den meisten Fällen durch einen Sprung in der Erdrinde gebildet wird, der sich bis zur Oberfläche erstreckt, oder ihr doch sehr nahe kommt. Im ganzen genommen darf behauptet werden, dass die Erregung der Erdbeben in den äusseren Schichten der Erdrinde stattfindet, dort, wo die Umwandlungen vor sich gehen, von denen die Geologie mit so augenfälligen Erscheinungen berichtet. Leicht bewegliche, elastische Schichte geraten bei den Erdbeben in Schwingungen, gerade etwa so, wie eine weiche Speise in einer Schüssel, die man anstösst. Aber gerade die Schüttelbewegungen der äussersten Erdschichten sind für den Menschen erfahrungsgemäfs besonders gefährlich, da sie den Boden zerreissen und die Bauwerke zerstören. Die

Schwingungen der Erdbebenwellen sind nun verschieden und wenn auch das Meer unter Umständen mitwirken kann, so müssen wir doch das Wesentliche in Schwingungen der festen Erdrinde suchen. Da stellt sich nun die Vermutung ein, dass es sich wohl oftmals um Eigenschwingungen der ganzen festen Erdrinde bis zu einer darunterliegenden sehr nachgiebigen Magmaschicht handele. Dass wirklich unter der festen Erdrinde eine sehr nachgiebige Magmaschicht vorhanden ist, dafür bieten die Hauptwellen der Erdbeben, so wie sie von den Seismographen registriert werden, einen sehr auffälligen Beleg. Auf Grund der Laufzeit der Hauptwellen hat man die Geschwindigkeit besonderer (b) Wellen auf etwa $3^1/_2$ km pro Sekunde berechnet und daraus weiter berechnet, es ergäbe sich als Dicke der Erdrinde bis zur Magmaschicht 14 bis 35 km Das sind Grenzwerte, die wohl passen könnten, man wird aber trotzdem aus anderen Erwägungen schliessen müssen, dass diese Zahlen von etwa 14 bis 35 km für die Dicke der festen Erdrinde doch nur als erste Annäherungen gelten dürfen.

Nächst der Erkenntnis des Weges und der Ausbreitung der Erdbebenwellen, war es von Wichtigkeit, den Weg und die Geschwindigkeit der Vorläufer zu erfahren. Es wurde darum die Laufzeitkurve für die ersten und zweiten Vorläufer von Erdbebenwellen bis zu 13 000 km Herddistanz berechnet. Die Berechnung der Wege beider Vorläufer gibt sehr richtige Aufschlüsse über die Struktur und die Substanz des Erdinnern, die dadurch um so glaubwürdiger erscheinen, als die nach den ersten und zweiten Vorläufern, also auf zwei voneinander ganz unabhängigen Wegen gewonnenen Resultate untereinander sehr nahe übereinstimmen. Konstruierte man nach graphischer Methode den Weg der ersten Vorläufer, so fand man, dass die Geschwindigkeit dieser Erdbebenwellen bis zu 1600 km Tiefe stetig zunimmt, dann aber konstant bleibt. Physikalisch besagte dies demnach, dass die Erde aus einem Kern von $^4/_5$ und einem Steinmantel von $^1/_5$ Erdradius Dicke bestehe. Auf einem zweiten rechnerischen Wege erhielt man ein Resultat, welches sich nur unwesentlich von dem ersten unterschied, indem jetzt für die Dicke des Steinmantels 1500 statt 1600 km gefunden wurde. Diese Resultate erhielten durch genaue spätere Berechnungen der ersten Vorläufer eine etwa 10 mal bessere Übereinstimmung. Ganz analog wurden dann die zweiten Vorläufer berechnet und man fand als Dicke des Steinmantels nach der ersten Methode 1522, nach der zweiten Methode 1440 km. Diese Berechnungen von E. Wiechert und K. Zoeppritz

wurden dann von L. Geiger zur Kontrolle nochmals doppelt durchgerechnet. Als Dicke des Steinmantels fand dann Geiger aus den ersten Vorläufern 1519, aus den zweiten 1438 km, alles Werte, die somit ziemlich genau übereinstimmen.

Als Laufzeit längs eines Erddurchmessers ergaben ferner die durchgeführten Berechnungen, dass sie bei den ersten Vorläufern 1171, bei den zweiten Vorläufern 2210 Sekunden dauert. Einen Schluss auf das Erdinnere können wir nur aus dem Verhalten der Vorläufer und ihrer Reflexwellen ziehen, da die Hauptwellen eines Bebens Rayleigh- oder Oberflächenwellen sind, die in das Innere der Erde nicht hinabtauchen.

Zur Vervollständigung des Beobachtungsmaterials und dessen intensiver Ausbeutung hat dann in neuerer Zeit B. Gutenberg die Göttingenschen Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben genauer durchrechnet und Beobachtungen über die Laufzeiten verschiedener Erdbebenwellen mitgeteilt, wobei er fand, dass Wellen für grosse Herddistanzen zwei einander ähnliche Geschwindigkeitsverteilungen als Funktion der Tiefe besitzen. Es ergibt sich ferner eine neue, sehr stark ausgeprägte Unstetigkeitsfläche im Erdinnern, die von Wiechert zwar früher schon vermutet wurde, aber nicht exakt nachzuweisen war. So kennen wir heute in unserer Erde vier Unstetigkeitsflächen, die folgende Konstanten besitzen:

Tiefe in km	Geschwindigkeit der Erdbebenwellen in km pro Sek. longitudinale	transversale Wellen
0	7,17	4,01
1200	11,80	6,59
1700	12,22	6,86
2450	13,29	7,32
	13,15	7,20
2900	13,15	7,20
	8,50	4,72
6370	11,10	6,15

Die Erde besteht demnach aus einem Kern ($r = 3500$ km) und aus einem Mantel, dessen Zusammensetzung sich an drei Stellen ungleichmäſsig, jedoch nicht sprungweise, ändert. Allgemein nehmen wir an, dass die Krümmung der Laufzeitkurve longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen daher rührt, dass diese Wellen beim tieferen

Hinabtauchen in das Erdinnere dichtere Schichten gefunden haben. Ebenso schliessen wir aus einer Geschwindigkeitsabnahme derselben Wellen eine Abnahme der Dichte. Stets aber muss Zunahme und Abnahme der Geschwindigkeit beider Wellenarten zugleich und in gleichem Sinne eintreten, wenn wir von der Laufzeit einen Schluss auf das Erdinnere ziehen wollen, da wir annehmen, dass nur die Geschwindigkeiten der Wellen verschieden, ihre Wege aber die gleichen sind. An zwei Punkten wird nun diese Forderung einer gleichzeitigen Änderung in gleichem Sinne bei beiden Wellen erfüllt, und zwar bei 4500, wo die bis dahin dauernd wachsende Geschwindigkeit einen mittleren konstanten Wert bekommt und bei 10 000 km, wo longitudinale und transversale Wellen verschwinden. Wir bemerken bei unseren seismologischen Beobachtungen aber auch Punkte, wo diese Änderungen nicht in gleichem Sinne, sondern einander entgegengesetzt ausfallen, bei 4500, 7000 und 8600 km. Dieses dreimalige bei longitudinalen und transversalen Wellen entgegengesetzte Ab- und Zurückbiegen von der Geraden ist in hohem Maſse merkwürdig und bedarf noch der Bestätigung und Aufklärung. Es ist zwar nicht ganz ausgeschlossen, dass unsere Schichtgrenzen infolge schalenförmiger Anordnung des Erdinnern vorhanden sind, wie Geiger und Gutenberg dies annahmen. Die Annahme mehrerer solcher selbständiger Schalen ist aber schon aus geologischen Gründen nicht sehr einleuchtend, da man wohl mehr als einen gewichtigen Grund für die von E. Wiechert nachgewiesene Schichtung bei 1500 km kennt, aber keine annehmbare Erklärung für eine Schichtung innerhalb des Stahlkerns anzugeben vermag.

K. Wegener kommt auf Grund allen vorliegenden Tatsachenmaterials und seiner Beobachtungen bei den seismischen Registrierungen am Samoa-Observatorium zu folgendem Wahrscheinlichkeitsbild der Erdschichtung.

1. Die oberste Gesteinskruste der Erde, in der wir zunehmende Dichte nach innen finden, ist von E. Süss nach ihren kennzeichnenden Bestandteilen Silicium und Magnesium Sima genannt worden. Auf ihr schwimmen die Kontinentalschollen, nach ihren Hauptbestandteilen Silicium und Aluminium von Süss als Sal bezeichnet.

2. In 1500 km Tiefe beginnt dann der von E. Wiechert zuerst nachgewiesene Metallkern der Erde, den Süss nach seinen wahrscheinlichen mineralischen Bestandteilen Nickel (Ni) und Eisen (Fe) Nife benannt, mit nahezu konstanter oder langsam zunehmender Dichte.

3. Möglich, wenn auch vor der Hand nicht zu erklären, ist es, dass dieser Nifekern schalenförmig unterteilt sein könne.

4. In etwa 3000 km liegt möglicherweise noch ein weiterer Kern. Man darf vermuten, sofern nicht der innerste Kern überhaupt aus ganz anderem Material von sehr viel grösserer Dichte und geringerem Elastizitätskoëffizienten besteht als Nife, dass dann die Erklärung für sein Verhalten gegenüber den Erdbebenwellen in Temperatur- und Druckverhältnissen zu suchen ist.

5. Endlich weist Wegener noch auf die Möglichkeit hin, dass die Wellen schon gar nicht in den Nifekern mehr eindringen und dass deshalb die Laufzeitkurve der longitudinalen und ebenso der transversalen Erdbebenwellen oberhalb 4500 km nur noch auf Reflektions- und Interferenz-Erscheinungen beruht, so dass also auch das völlige Verschwinden dieser Wellen bei 10 300 km nicht auf der Konstitution des Erdinnern zu beruhen braucht. Die einzigen Wellen, die uns über das Innere der Nifekugel Aufschluss gäben, wären dann die bei 12 000 km wieder auftauchenden.

Unter der Annahme fortgesetzter Beugung würden wir Abnahme der Dichte nach dem Innern zu erhalten. Das würde wiederum unseren Vorstellungen über die ordnende Kraft der Schwere widersprechen, und auch im Widerspruch stehen mit den Messungen der Gesamtmasse der Erde, die auf eine mittlere Dichtigkeit des gesamten Innern und des Nifekerns von etwa 8 bis 9, bezogen auf Wasser, schliessen lassen.

Einstweilen entsprechen jedoch unseren physikalischen Vorstellungen nur die unter 1 und 2 mitgeteilten Sätze; alle anderen Betrachtungen zu 3 bis 5 können noch nicht als gesichert gelten.

Da unsere Erdrinde nur ein spezifisches Gewicht von 2,7 (nach Clarke) besitzt, die ganze Erde aber ein spezifisches Gewicht von 5,57 zeigt, so folgt daraus, dass sich die chemische Zusammensetzung nach dem Innern zu ändern muss. Dies führt uns, an der Hand aller einschlägigen Beobachtungen zu der Annahme, dass im Innern der Erde ein metallischer Nickeleisenkern mit einem Radius von etwa 5000 km vorhanden sein muss, der dann erst von einer 1500 km dicken Silikatschale umschlossen wäre. Ein allmählicher Übergang von den leichten Silikaten der Erdoberfläche zu den spezifisch schwereren der grösseren Tiefe und von da zum metallischen Kern muss gleichfalls wohl angenommen werden. Für diese Meinung spricht auch die chemische Zusammensetzung der

Meteoriten, in denen das gediegene Nickeleisen besonders reichlich ist und in Verbindung mit wesentlich nur Magnesium und Eisensilikaten steht.

Auch die Erfahrungen der Petrographie machen es wahrscheinlich, dass bei der Abkühlung der Erde aus dem Schmelzfluss sich einerseits gediegenes Nickeleisen abgeschieden und im Erdkern angesammelt hat und dass andererseits sich eine Zone darüber befinden muss, deren Zusammensetzung wesentlich den zuerst sich ausscheidenden Mineralien entspricht. Diese aber sind femischer Natur, sie enthalten vorwiegend Magnesium und Eisen.